



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Įtampos stabilumo elektros sistemoje analizė

Baigiamasis magistro projektas

Žygimantas Turskis

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Įtampos stabilumo elektros sistemoje analizė

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Žygimantas Turskis

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Asist. Almantas Bandza

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Žygimantas Turskis

Įtampos stabilumo elektros sistemoje analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Žygimantas Turskis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Turskis, Žygimantas. Įtampos stabilumo elektros sistemoje analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Įtampos stabilumas, jautrumas, elektros energijos sistema.

Kaunas, 2024. 45 p.

Santrauka

Nuolatinė atsinaujinančių energijos technologijų plėtra pamažu transformavo įprastą energetikos infrastruktūrą ir atnaujino ją į modernizuotą sistemą su labiau paskirstytos generacijos galimybėmis. Palyginti su elektros tinklais, kuriuose naudojama sinchroninė generacija, inverteriais pagrįsti tinklai fiziškai negali užtikrinti didelės inercijos, o tai reiškia, kad tokioms sistemoms reikia išsamesnių tyrimų, susijusių su stabilumu. Todėl atsinaujinančiais energijos ištekliais grindžiamų elektros energijos sistemų, kuriuose yra daug inverterių ir paskirstytųjų energijos šaltinių, įtampos stabilumo analizei reikalingi tinkami analitiniai metodai.

Šiame darbe nagrinėjamas elektros energetikos sistemos įtampos stabilumas, kuriame vyrauja paskirstyta generacija. Susidaromas teorinis IEEE–9 tinklo modelis, kuriame tiriama elektros perdavimo sistemos įtampos elgsena. Darbe identifikuojamas pažeidžiamiausias tinklo modelio elektros mazgas, Pasitelkiant QU ir nenumatytų atveju analizės metodais nagrinėjama sistemos įtampos elgsena prie skirtingų darbo režimų. Imituojamas sistemos modelis su stabilumą gerinančiais elementais, aptariami ir palyginami gauti rezultatai.

Turskis, Žygimantas. Research of Voltage Stability in Power System. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Audrius Jonaitis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Field of study and field (group of study fields): electrical engineering, engineering sciences.

Key words: Voltage stability, sensitivity, electric power system.

Kaunas, 2024. 45 p.

Summary

The continuous development of renewable energy technologies has gradually transformed the conventional energy infrastructure and upgraded it into a modernised system with more distributed generation capabilities. Compared to electricity grids using synchronous generation, inverter-based grids cannot physically provide high inertia, which means that such systems require more detailed stability studies. Therefore, voltage stability analysis of renewable energy-based power systems with a large number of inverters and distributed energy sources requires appropriate analytical methods.

In this paper, the voltage stability of a power system dominated by distributed generation is considered. A theoretical IEEE-9 network model is developed to study the voltage behaviour of the power system. The work identifies the most vulnerable node in the network model, Using QU and contingency analysis methods, the voltage behaviour of the system under different operating modes is investigated. The system model is simulated with stability-improving elements and the results are discussed and compared.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Apžvalginė dalis.....	11
1.1. Elektros energetikos sistemos stabilumas	11
1.2. Elektros energetikos sistemos stabilumo klasifikacija	11
1.2.1. Rotoriaus kampo stabilumas.....	12
1.2.2. Dažnio stabilumas	13
1.3. Įtampos stabilumas	13
1.4. Įtampos griūtys elektros energetikos sistemose	14
1.5. Veiksniai sukeltys įtampos nestabilumą.....	15
1.6. Statinės įtampos stabilumo analizės metodai	15
1.6.1. PU kreivių metodas	16
1.6.2. Savųjų verčių analizės metodas.....	17
1.6.3. Energijos nuostolių jautrumas indeksas	17
1.7. Paskirstytos generacijos šaltinių poveikis įtampos stabilumui.....	18
1.8. Kompensaciniai įrenginiai.....	19
1.8.1. Šuntiniai kondensatoriai	19
1.8.2. Šuntiniai reaktoriai	19
1.8.3. SVR – Statinis reaktyviosios galios kompensatorius	20
1.8.4. STATCOM – Statinis sinchroninis kompensatorius	20
2. Metodinė dalis.....	22
2.1. Elektros energetikos tinklo modelio elementų sudarymo principas.....	22
2.1.1. Elektros perdavimo linija	22
2.1.2. Galios transformatorius	22
2.1.3. Generatorius	22
2.2. Newthon-Raphson galios srautų skaičiavimų metodika.....	23
2.3. Įtampos jautrumo koeficientas	24
2.4. Nenumatytų atvejų analizė	25
2.5. QU kreivių metodas.....	27
3. Tiriamoji dalis.....	28
3.1. QU kreivių analizė.....	32
3.2. Nenumatytų atvejų tyrimas.....	34
Išvados	38
Literatūros sąrašas	39
Priedai.....	42

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Masiniai elektros energijos tiekimo nutrūkimai susiję su įtampos griūtimi.[3, 12]	14
2 lentelė. Elektros linijos pagrindiniai parametrai PSS/E programinės įrangos aplinkoje	22
3 lentelė. Galios transformatoriaus pagrindiniai parametrai PSS/E programinės įrangos aplinkoje	22
4 lentelė. Generatoriaus pagrindiniai parametrai PSS/E programinės įrangos aplinkoje	23
5 lentelė. Elektros sistemos linijų parametrai	28
6 lentelė. Elektros sistemos generatorių parametrai.....	28
7 lentelė. Elektros sistemos apkrovų parametrai.....	28

Paveikslų sąrašas

1 pav. Elektros sistemos stabilumo klasifikavimas.....	12
2 pav. Aktyviosios galios – įtampos (PU) kreivė.....	16
3 pav. Principinė kondensatoriaus pajungimo schema	19
4 pav. Šuntinio reaktoriaus principinė pajungimo prie perdavimo linijos (X_{R2}) ir pastotės šynų (X_{R1} , X_{R3}) schema.....	19
5 pav. SVR įrenginio konfigūracijos.....	20
6 pav. Principinė STACOM įrenginio schema	21
7 pav. Nenumatytų atvejų analizės (<i>angl. Contingency analysis</i>) programinis veikimo algoritmas	26
8 pav. Reaktyviosios galios – įtampos (QU) kreivė.....	27
9 pav. Teorinio IEEE-9 elektros sistemos modelis	29
10 pav. Elektro tinklo modelio įtampos lygio pasiskirstymo schema.....	30
11 pav. Sisteminių elektros mazgų įtampos profiliai	31
12 pav. Sisteminių elektros tinklo mazgų jautrumo koeficientai.....	31
13 pav. 6-ojo elektros mazgo QU kreivė normaliu maitinimo režimu	32
14 pav. Kompensacinio įrenginio vieta teorinėje elektros sistemoje.....	33
15 pav. 6-ojo elektros mazgo su 12,85 Mvar kompensaciniu įrenginiu QU kreivė normaliu maitinimo režimu	33
16 pav. Sisteminių elektros mazgų įtampos profiliai prijungus 12,8Mvar kompensacinį įrenginį ..	34
17 pav. PSS/E funkcijos <i>Contingency analysis</i> aprašymo algoritmas	34
18 pav. 6-ojo elektros mazgo QU kreivės nenormaliu maitinimo režimu	35
19 pav. 6-ojo elektros mazgo QU kreivės nenormaliu maitinimo režimu, prijungus 30 Mvar kompensacinį įrenginį	36
20 pav. Sisteminių elektros mazgų įtampos profiliai prijungus 30 Mvar kompensacinį įrenginį	36

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AEI – Atsinaujinantys energijos ištekliai

EES – Elektros energetikos sistema

SVR – Statinis VAR kompensatorius

STATCOM – Statinis sinchroninis kompensatorius

PU – Aktyvioji galia – Įtampa

QU – Reaktyvioji galia – Įtampa

Įvadas

Moderniame šiuolaikinio pasaulio elektros tinkle labai svarbu išlaikyti stabilumą. Tarp daugybės iššūkių su kuriais susiduriama elektros energetikos srityje, įtampos stabilumo tyrimus galima laikyti vienus svarbiausių tyrimų norint užtikrinti patikimą elektros energijos sistemų veikimą. Įtampos stabilumą galima apibūdinti kaip gebėjimą palaikyti stabilią įtampą visuose sistemos mazguose priimtinosiose ribose normaliomis darbo sąlygomis ir po sutrikimų išlaikyti tinkama sistemos balansą.

Norint suprasti įtampos stabilumą, reikia įsigilinti į įvairių elektros energijos sistemos veikimo principus ir sąveikas. Tai apima įtampos profilių, reaktyviosios ir aktyviosios galios gamybos ir vartojimo, sistemos varžų, apkrovų supratimą ir analizę. Įtampos stabilumo tyrimai neapsiriboja vien teorinėmis nuostatomis, bet apima ir praktinį taikymą, turintį įtakos elektros energijos sistemų planavimui, eksploatavimui ir priežiūrai elektros sistemose.

Įtampos stabilumo svarba ypač išryškėja didėjant elektros energijos poreikiams, integruojant atsinaujinančius energijos šaltinius ir sudėtingėjant tarpusavyje sujungtiems tinklams. Vadovaujantis atsinaujinančiųjų išteklių energijos direktyvą (ES) 2018/2001 nustatyta, kad Europos Sąjungoje iki 2030 m. bent 32% pagaminamos energijos turi sudaryti atsinaujinančios energijos išteklių (toliau – AEI). Lietuvoje 2021 m. AEI galutiniame energijos suvartojime sudarė 28,10 %. Šiuos rezultatus daugiausia lėmė AEI dalis šilumos sektoriuje, kuri sudarė 48,62 %, AEI dalis elektros gamyboje sudarė 20,92 %, o transporto sektoriuje – 6,69 % [1]. Skirtingai nuo sinchroninės generacijos naudojančių elektros tinklų, inverteriais grįstos sistemos fiziniu būdu negali užtikrinti didelės inercijos. Susidarantys įtampos lygio svyravimai gali sukelti nenumatytus gedimus, įtampos griūtį ir galiausiai elektros energijos tiekimo nutraukimą, turintį didelių ekonominių ir visuomeninių pasekmių. Todėl įtampos stabilumo palaikymas yra labai svarbus siekiant padidinti elektros energijos sistemų atsparumą ir patikimumą, atsižvelgiant į kylančius iššūkius ir neapibrėžtumą.

Šiame tyrime analizuojama teorinės elektros sistemos įtampos stabilumas ir elgsena. Šio tyrimo tikslas yra išsamiau išnagrinėti elektros energijos sistemos pažeidžiamiausius mazgus bei aptarti sprendimus jų gerinimui. Nagrinėjama, kaip galima padidinti šių mazgų atsparumą, siekiant užtikrinti sistemos stabilumą bei patikimesni energijos perdavimą.

Darbo tikslas – ištirti modeliuojamos elektros sistemos įtampos stabilumą pažeidžiamiausiam elektros tinklo mazge.

Tyrimo uždaviniai:

1. sudaryti teorini elektros sistemos modelį, skirtą įtampos stabilumui ištirti;
2. nustatyti elektros sistemos pažeidžiamiausią tinklo mazgą ir jo kritinius rodiklius;
3. pasirinkti sprendimo būdą sistemos stabilumo didinimui;
4. patikrinti, sistemos veikimą tinkle atsiradus gedimui;
5. palyginti turimos ir optimizuotos sistemos rodiklius.

1. Apžvalginė dalis

1.1. Elektros energetikos sistemos stabilumas

Elektros energetikos sistema (toliau – EES) yra viena sudėtingiausių žmogaus sukurtų infrastruktūros sistemų. Metai iš metų vis labiau priklausime nuo elektros energijos, nes jos vartojimas nuolat auga, besiplečianti pramonė, beperstojo vykstantis elektrifikacijos procesai paverčia elektros energija beveik kiekvienos sistemos esminiu elementu. EES kertinis uždavinys yra nepertraukiamas elektros energijos tiekimas užtikrinant patikimos ir stabilios sistemos veikimą. Nepajėgiant išlaikyti sistemos stabilioje darbinėje būsenoje, pasidaro aišku, kad užtikrinti nepertraukiamos ir patikimos elektros energijos tiekimo nepavyks.

Dėl labai sudėtingos ir nuolat laike kintančios ESS darbo struktūros, ją privalu nuolat stebėti ir valdyti, atsižvelgiant į didelį kiekį subjektų kaip, aplinkos sąlygos, generacijos kiekiai, suvartojimas ir kt. Taip sistemoje gali įvykti ir nenumatytos situacijos, kurios sparčiai gali pabloginti trikdžio vietinės ar net didesnės teritorijos sistemos darbą, todėl visada reikia būti pasiruošus įvairiems sisteminiams įvykiams ir atsiradusiems trikdžiams spręsti.

Jei elektros energijos sistema nepajėgtų palaikyti sisteminio patikimumo ir stabilumo, tai turėtų blogų pasekmių visuomenei ir vietovės, o galbūt ir visos šalies ekonomikai. Tai apimtų įvairių įrenginių gedimus, vartotojų atjungimą, sistemos pasidalijimą ar net elektros tinklo griūtį (*angl. System collapse*). Dėl to atsirastu nemaži ekonominiai praradimai, o atkurti normalų sistemos darbą galėtų užtrukti nuo kelių valandų iki keleto dienų.

1.2. Elektros energetikos sistemos stabilumo klasifikacija

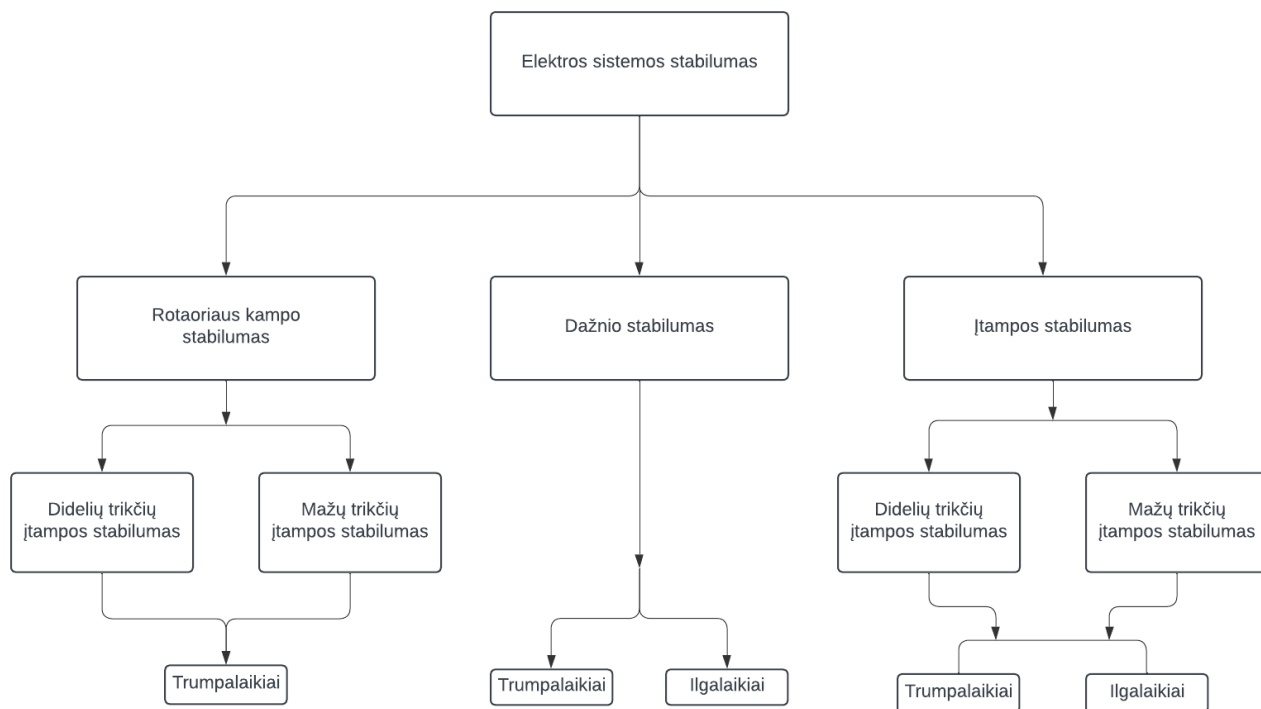
Elektros energetikos sistemos nestabilumas gali būti įvairaus pobūdžio, stabilumui gali padaryti įtakos įvairūs veiksniai. EES stabilumo suklasifikavimas remiasi atsižvelgiant į stabilumo problemų analizavimu ir metodais, kurie padėtų pagerinti sisteminį stabilumą.

Pradedant, galima išskirti 2 stabilumo rūšis – tai statinis ir dinaminis stabilumas [2]:

- 1) Statinis stabilumas yra elektros energetikos sistemos savybė išlaikyti sinchronizmą nedideliems trikdžiams atsiradus. Trikdžis laikomas pakankamai mažu, jei sistemos lygčių ištiesinimas yra galimas sistemos analizės tikslais.
- 2) Dinaminis stabilumas yra elektros energijos sistemos savybė išlaikyti generatorių sinchroninį darbą esant dideliems trikdžiams įvykus (pavyzdžiui, trumpieji jungimai, didelės galios generatoriaus gedimas.).

Dėl EES sudėtingumo, stabilumą galima suklasifikuoti į kelis skirtingas kategorijas, priklausomai nuo trikdžio pobūdžio ir trukmės [3]:

1. rotoriaus kampo stabilumas;
 - 1.1. didelių trikčių stabilumas;
 - 1.2. mažų trikčių stabilumas;
2. Dažnio stabilumas
3. Įtampos stabilumas
 - 3.1. didelių trikčių stabilumas;
 - 3.2. mažų trikčių stabilumas.



1 pav. Elektros sistemos stabilumo klasifikavimas.

Elektros energijos sistemos stabilumą galima apibrėžti kaip savybę, leidžianti jai išlikti normalaus darbo pusiausvyroje ir sugrįžti į priimtina pusiausvyrą po trikdžių.

1.2.1. Rotoriaus kampo stabilumas

Rotoriaus kampo stabilumas apibrėžia sinchroninių generatorių, prijungtų prie vientisos elektros sistemos, gebėjimą išlikti sinchroniniame režime ne tik esant normalioms darbo sąlygoms, bet ir atsiradus trikdžiui sistemoje [4,5]. Tai lemia sistemoje esančių sinchroninių generatorių gebėjimas išlaikyti pusiausvyrą tarp elektromagnetinio ir mechaninio sukimo momento. EES gali pereiti į nestabilią tinklo būseną dėl padidėjusio sinchroninių generatorių kampo svyravimų. Tarpusavio sinchroninių generatorių sinchroninio darbo praradimas taip pat gali sukelti elektros sistemos nestabilumą.

Vienam generatoriui greitėjant, jo sukimo momentas didėja ir kitų generatorių sukimo momento atžvilgiu. Esminė rotoriaus kampo stabilumo sąlyga yra palaikyti vienodą generatorių sukimosi greitį bei išlaikyti kiekvieno generatoriaus pusiausvyrą tarp mechaninio sukimo momento ir elektrinio sukimo momento. Kitaip tariant, sistemos stabilumas priklauso nuo generatorių gebėjimo greitai sureaguoti į kampo pokytį ir gebėjimo užtikrinti reikiamą sukimo momentą [6].

Sinchroninių generatorių elektromagnetinio sukimo momento pokytį po trikdžio galima analizuojamas dviem būdais:

- 1) Sinchronizuoti sukimo momentą fazėje su rotoriaus kampo pokyčiu;
- 2) Valdant sukimo momentą fazėje su greičio pokyčiu.

Nepakankamas sukimo momento sinchronizavimas gali sukelti aperiodinį nestabilumą, o nepakankamas sukimo momento reguliavimas gali lemti periodinį nestabilumą [7]. Šie veiksniai yra esminiai rotoriaus kampo stabilumui sistemoje tirti.

1.2.2. Dažnio stabilumas

Dažnio stabilumas, tai EES savybė išlikti stabilioje sistemos būsenoje ir atstatyti ją po didelio trikdžio tinkle. Dažnio nestabilumas galima patikti kaip nepastovius ilgalaikius dažnio svyravimus, susidariusius dėl apkrovų, generuojančių šaltinių atsijungimų ar gedimų. Didelėse elektros energijos sistemose dažnio stabilumo praradimas dažniausiai susijęs su sistemos pasidalijimu [8]. Todėl pagrindinė užduotis yra užtikrinti, kad kiekviena pasidalijusi posistemė dirbtų priimtiniu, stabiliu, režimu. Keletas pagrindinių veiksnių, galinčių sukelti dažnio nestabilumą yra:

- Netinkamas generuojančių šaltinių valdymas;
- blogas dažnio reguliavimas sistemoje;
- netinkamas apsaugos įrenginių veikimas;
- Sisteminiai gedimai,
- Įtampos nestabilumas.

Nors šios kategorijos susijusios su skirtingais stabilumo rodikliais, analizavimo požiūriu jos iš tikrųjų yra viena kitos tęsiniai be aiškiai apibrėžtų ribų. Šiame darbe plačiau nagrinėjamas įtampos stabilumas elektros sistemose.

1.3. Įtampos stabilumas

Įtampos stabilumas – visų elektros sistemos mazgų gebėjimas išlaikyti stabilią įtampą normalioje darbinėse sąlygose būsenoje ir po to, kai elektros sistemoje įvyksta gedimas [9]. Jis priklauso nuo sistemos gebėjimo išlaikyti arba atkurti pusiausvyrą tarp apkrovos poreikio ir elektros energijos tiekimo apkrovai. Kitaip tariant, kai sistemos apkrovai tiekiamą galią didėja didėjant srovei, sistema yra stabilios įtampos būsenos, priešingu atveju sistema yra nestabilios įtampos būsenos. Nestabilumą sistemoje gali sukelti dėsningas įtampos lygio kilimas ar kritimas skirtinguose EES mazguose. Sistemai pasiekus įtampos nestabilumo ribas, gali būti paveiktas visos sistemos vientisumas, kas lemtų vartotojų tiekimo sutrikimas ar atjungimus.

Vienas iš esminių įtampos nestabilumo veiksnių – įtampos kritimas, kuris atsiranda kai aktyviosios ir reaktyviosios galios srautai elektros perdavimo tinkle susieti su sistemos varžomis. Atsiranda riboti tiekimo linijų pralaidumai, kai išnaudojama visa reaktyviosios galios atsarga sistemoje. Tinklo apkrovos reaguojamos į tinklo gedimus taip pat gali sukelti nemenkus įtampos pokyčius tinkle. Įprastai vartotojams įtampos lygio atstatymas skirstomajame tinkle išpildomas per įrengtus įtampos reguliatorius, o tokiu būdu normalizuojama įtampa sukuria dar didesnę įtampų skirtumą, taip perdavimo tinkle dar labiau padidindama įtampos kritimą.

Iš 1 paveikslo matyti, kad pagal trikdžių dydį įtampos stabilumas gali būti skirstomas į mažų ir didelių trikdžių įtampos stabilumą:

- 1) Mažų trikdžių įtampos stabilumas (statinis įtampos stabilumas) – tai visų elektros sistemos mazgų gebėjimas išlaikyti stabilią įtampą po to, kai sistema patiria nedidelius trikdžius, pavyzdžiui, padidėjus apkrovai [10].

Statinis įtampos stabilumas apibrėžia kaip sistemos įtampa reaguos fiksuotu laiko momentu. Esminiai veiksniai dėl kurių atsiranda statiniai įtampos nestabilumas yra nusistovėjusio pobūdžio. Dėl to, statinio įtampos stabilumo analizės nustatant įvairias stabilumas ribas darančias įtaką sisteminiam stabilumui.

- 2) Didelių trikdžių įtampos stabilumas (dinaminis įtampos stabilumas) – tai visų elektros sistemos mazgų gebėjimas išlaikyti stabilią įtampą po to, kai sistemą išstinka dideli trikdžiai, pavyzdžiui, sisteminiis gedimas, generatorių ar linijų atjungimas [10].

Dinaminis įtampos stabilumas apibrėžia kaip sistemos įtampą reaguos realiuoju laiko momentu. Siekiant įvertinti dinaminį įtampos stabilumą reikia susidaryt netiesinį sistemos modelį tyrimui atlikti.

Įtampa yra vienas iš esminių tinklo parametru, kuris turi būti palaikomas stabilioje būsenoje kiekviename mazge, nes įtampos stabilumo praradimas gali turėti didelių padarinių Nestabilumas tinkle gali išvystyti iki viso elektros tinklo griūtis, kai visuose sistemos mazguose pradeda mažėti įtampa.

1.4. Įtampos griūtys elektros energetikos sistemose

Įtampos griūtis (*angl. voltage collapse*) apibrėžiamas kaip procesas, kai įtampa elektros sistemoje nukrenta iki nepriimtinos ribos dėl įtampos nestabilumą sukėlusiu gedimų eilės, dėl kurių vėliau prarandama įtampa didelėje sistemos dalyje [11]. Paprastai įtampos nestabilumas iš pradžių yra vietinis reiškinys, apimantis elektros tinklo apkrovos zoną, tačiau jis gali išplisti ir galiausiai šuoliškai sukelti elektros energijos tiekimo nutraukimą didesnėje teritorijoje. 1 lentelėje pateikiama keletas pavyzdžių nukentėjusių nuo įtampos griūtis.

1 lentelė. Masiniai elektros energijos tiekimo nutrūkimai susiję su įtampos griūtimi.[3, 12]

Nr.	Šalis	Data	Elektros energijos nutraukimo dydis, MW	Elektros tiekimo nutraukimo trukmė
1	JAV	1977-07-12	5868	25 h 59 min
2	Prancūzija	1978-12-19	29000	8 h 30 min
3	Belgija	1982-08-04	2400	1 h 28 min
4	Kanada	1982-12-14	15473	5 h 30 min
5	Švedija	1983-12-27	11400	5h 20 min
6	Prancūzija	1987-01-12	1500	6-7 min
7	Japonija	1987-07-23	8168	3 h 21 min
8	Kanada	1989-03-13	9450	2 h 45min
9	JAV	1996-07-02	1,5 – 2 mln. vartotojų	1,5 – 3h

Elektros sistemų inžinieriai susiduria su iššūkiu, kaip atpažinti sąlygas, kurios gali lemti įtampos griūtį ir kaip išvengti tokio pavojaus, tačiau iš šalių patyrusių įtampos griūtį, apibendrinant įtampos avarijas elektros energetikos sistemose, buvo priimta keletas išvadų [3]:

- 1) Prieš įtampos griūtį sistemos apkrova labai didelė, sistemos reaktyviosios galios rezervas yra minimalus, o perdavimo linijų pralaidumų apkrova artėja prie didžiausios galios ribos.
- 2) Įtampos kritimo priežastys gali būti įvairios: laipsniškai didėjančios sistemos apkrovos, staigūs dideli gedimai, generatoriaus gedimas; didelės apkrovos linijoje, klaidingi tinklo operatorių sprendimai neįvertinus darbo sąlygų.
- 3) Kai tiekimo linijoje didelės apkrovos, įtampa gali sutrikti, jei dėl padidėjusios apkrovos arba elemento gedimo priimančioji sistema nuolat reikalauja palaikymo didinti reaktyviąją galią.
- 4) Įtampos žlugimui paprastai būdingas lėtas įtampos silpnėjimas, kuris lemia daugelio įtampos valdymo įtaisų ir apsaugos sistemų veiksmų ir sąveikos sanakaupa. Įtampos žlugimo procesas gali trukti kelias minutes, o kai kurie įtampos žlugimai, esant dinaminėms sąlygoms, gali trukti kelias sekundes. Tokios avarijos paprastai įvyksta dėl nepalankių apkrovos elementų kaip indukcinis variklis arba nuolatinės srovės keitiklių. Įtampos nestabilumo trukmė yra tokia pati kaip ir rotoriaus kampo nestabilumo trukmė. Daugeliu atvejų įtampos nestabilumo ir rotoriaus kampo nestabilumo reiškiniai yra susiję vienas su kitu.

- 5) Įtampos griūtis gali kilti dėl netinkamo kompensacinių įrenginių naudojimo. Veiksmingiausia būtų naudoti valdymo elementus turinčius kompensacinius įrenginius, tačiau jie yra santykinai brangūs.

1.5. Veiksniai sukeliantys įtampos nestabilumą

Įtampos nestabilumą elektros energetikos sistemoje gali sukelti santykinai nemažai veiksnių, kurie gali turėti įvairių priežasčių ir padarinių elektros tinklui bei jo veikimui [13]. Toliau glaustai aptariami keletas veiksnių, kurie gali sukelti įtampos nestabilumą.

- 1) **Apkrovų pokyčiai.** Apkrovos pokyčiai gali būti įvairių formų ir priežasčių, įskaitant staigius apkrovos šuolius, kurie gali kilti dėl netikėtų vartotojų energijos poreikių pokyčių arba dėl staigaus generatorių pajėgumų pokyčio. Kai apkrova viršija sistemos pajėgumus, įtampos lygis gali sumažėti, nes nebegalima užtikrinti pakankamo energijos tiekimo visiems vartotojams. Staigūs pokyčiai gali netikėtai paveikti įtampą elektros sistemoje, kuriant pavojų jos stabilumui.
- 2) **Generacijos pokyčiai.** Kai didelės galios generatoriai atjungiami nuo tinklo arba yra staigus energijos poreikio sumažėjimas, gali sukelti staigias įtampos svyravimus, kurie gali būti labai nepalankūs elektros sistemai.
- 3) **Linijų perkrovimas.** Perkrautos elektros linijos gali būti nesugebėjusios patenkinti didelio energijos srauto, kuris gali sukelti įtampos nestabilumą. Tai gali atsirasti dėl pernelyg didelio energijos perdavimo per tam tikrą elektros liniją arba dėl apsaugų veikimo, kurios apribos linijų galios perkėlimą.
- 4) **Reaktyviosios galios trūkumas.** Reaktyvioji galia yra būtina, kad būtų palaikytas tinkamas įtampos lygis sistemoje. Kai trūksta reaktyviosios galios, sistema gali tapti nestabili, o tai gali lemti įtampos nukrypimus, netinkamą įtampos lygio valdymą ir galiausiai įtampos griūtį.
- 5) **Įtampos reguliavimo gedimai.** Tokie gedimai gali atsirasti dėl netinkamai sureguliuotų reguliatorių arba dėl neveikiančių įtampos reguliavimo įrenginių. Tokiu atveju, sistema gali negalėti adekvačiai valdyti įtampos lygio, o tai gali sukelti nuolatinis arba laikinus įtampos nukrypimus, kurių pasekmės gali būti rimtos.
- 6) **Elektros tinklo pajėgumų ribojimai:** Pajėgumų ribojimai gali kilti dėl perdavimo linijų perkrovų ar kitų pajėgumų apribojimų. Kai tiekimo tinklo perdavimo pajėgumai yra riboti, tai gali sukelti įtampos nukrypimus ir destabilizuoti elektros sistemą, ypač esant aukštesniam krūviui.
- 7) **Gamtinių veiksnių poveikis.** Audros, žaibai, sniego ar lietaus perteklius gali sukelti gedimus elektros linijose ir įtampos nestabilumą. Gamtiniai veiksniai gali paveikti elektros infrastruktūrą ir sukelti trikdžius, kurie gali sukelti įvairių mastų įtampos nestabilumą.

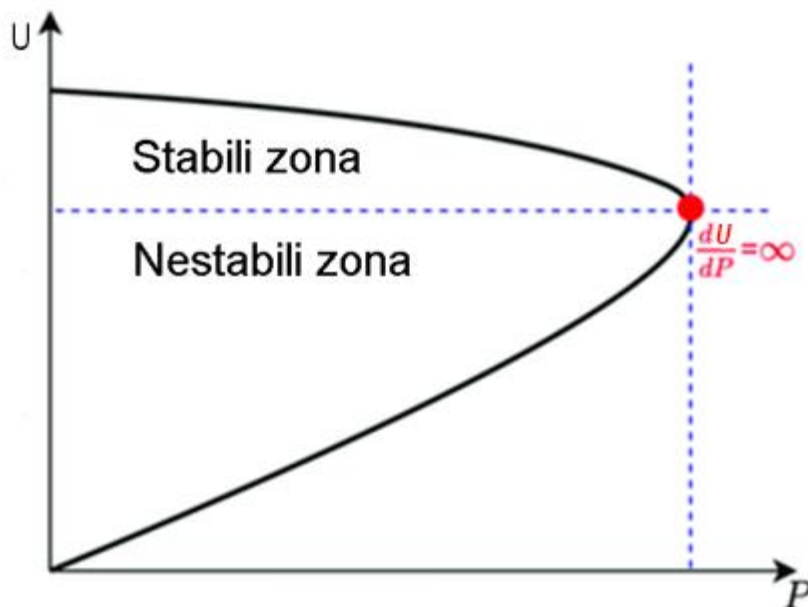
Šie veiksniai rodo, kad įtampos stabilumas yra sudėtingas ir jautrus klausimas, kurį reikia atidžiai vertinti ir valdyti, siekiant užtikrinti patikimą elektros sistemų veikimą. Tai reikalauja nuolatinio stebėjimo, tinkamų valdymo priemonių ir operatyvaus reagavimo į susidariusias aplinkybes.

1.6. Statinės įtampos stabilumo analizės metodai

Atliekant statinio įtampos stabilumo analizę daugiausia dėmesio skiriama elektros energijos sistemos elgsenai nusistovėjusioje būsenoje įvertinti ir nustatyti sąlygas, kuriomis gali atsirasti įtampos nestabilumas. Toliau apžvelgiami keli statinio įtampos stabilumo analizės metodai:

1.6.1. PU kreivių metodas

Nagrinėjant įtampos stabilumą, svarbus ryšys tarp perduodamos aktyviosios galios (P) ir priimančios įtampos (U). Įtampos stabilumo analizės procesas apima aktyviosios galios perdavimą iš vieno sistemos regiono į kitą ir poveikio sistemos įtampoms. Tokio tipo analizė paprastai vadinama PU tyrimu [14]. PU priklausomybės kreivė apibrėžia statinės būsenos apkrovos ribas, susijusias su įtampos stabilumu. Iš principo, jos parodo sistemos mazgo įtampos priklausomybę nuo aktyviosios galios apkrovos mazge, kai ji didinama nuo nulio iki didžiausios galimos vertės. EES įtampos nestabilumas dažnai pasireiškia tuo momentu, kai sistema yra arti maksimalios galios perdavimo. Kritinės būsenos metu, jei apkrova neženkliai padidėja, o sistemos įtampa smarkiai sumažėja, tai gali indikuoti sistemos įtampos nestabilumo būseną. PU kreivė yra pagrindinė statinio įtampos stabilumo analizės priemonė, pagrįsta įtampos stabilumo mechanizmu, kurioje aktyviąją galią galima išreikšti kaip tam tikros srities bendrąją apkrovą, arba perdavimo galia tam tikroje perdavimo atkarpoje, linijoje, o įtampą yra elektros sistemos mazgo įtampa. Nustatant apkrovos ir mazgo įtampos ryšį, PU kreivė gali vizualiai ir nuolat rodyti sistemos įtampos mažėjimo procesą ar net griūtį didėjant apkrovai (2 pav.).



2 pav. Aktyviosios galios – įtampos (PU) kreivė

Apskaičiuojant kiekvieno sistemos mazgo PU kreives taškus, taip pat galima nustatyti ir du svarbius įtampos stabilumo parametrus: sistemos mazgo kritinę įtampą ir ribinę galią. 2 paveiksle pateikta principinė PU priklausomybės kreivė, kur PU kreivės viršūnė $\frac{dU}{dP} = \infty$ atitinka sistemos apkrovos ribinę būseną – kritinį įtampos stabilumo tašką. PU kreivės viršutinė dalis yra stabilios sistemos veikimo zona, atitinkamai apatinė kreivės dalis yra žemos įtampos sprendinys arba nestabilumo zona. Kai sistemos aktyvioji apkrova palaipsniui didėja, sistema pasiekia aktyviosios galios pralaidumo maksimumus, o toliau didėjant aktyviajai galiai, sistema praranda stabilumą ir pereina į nestabilią sistemos darbą. Kritinį įtampos stabilumo tašką dar galima įvardinti kaip sisteminės pusiausvyros riba arba griūties tašką [15].

Šis metodas gali būti naudojamas sistemos įtampos stabilumo atsargai nustatyti ir parodyti kiekvieno apkrovos mazgo gebėjimą išlaikyti įtampos stabilumą.

1.6.2. Savųjų verčių analizės metodas

Savųjų verčių analizės metodas (*angl. Eigenvalue Analysis* taikomas naudojamas pritaikant Jakobiano matricios J (*angl. Jacobian matrix*) galios srautams lygtį:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [U] \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_m \end{bmatrix} [U]^T \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

Šią lygtį taip pat galima išreikšti kaip:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^m \sigma_i^{-1} u_i v_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

Čia, m – galios srauto matricios eilė;

σ_i – i -tosios eilės savoji vertė;

v_i ir u_i atitinkamai yra atitinkami kairysis ir dešinysis savieji vektoriai.

Iš (2) lygties matyti, kad jei savoji vertė artima nuliui, bet koks mažas galios pokytis sukels didelį būsenos kintamojo pokytį. Atliekant savųjų verčių analizę, dešinysis savasis vektorius u_m , atitinkantis mažiausią savąją vertę σ_m , atspindi jautriausią aktyviųjų ir reaktyviųjų trikdžių kryptį esant minimaliam režimui. Kai galios trikdžių kryptis atitinka u_m , sukeltas būsenos dydžio pokytis yra didžiausias. Todėl dešinysis savasis vektorius, atitinkantis minimalaus režimo savitąją vertę, atspindi kryptį, kuria sistema tam tikru mastu yra labiausiai linkusi į nestabilumą [3, 16]. Savųjų verčių analizė gali padėti nustatyti silpniausius sistemos mazgus ir įtampos stabilumo sritis. Jei (2) lygtyje $P = 0$, $Q = e_k$, kur e_k yra vienetinis vektorius, kurio k -asis elementas yra 1, o kiti elementai yra 0. Daroma prielaida, kad sistemos aktyviosios galios srautų dydis išlieka nepakitęs, o vienetinė reaktyvioji galia įjunginama tik k -ajame mazge, dėl to sistemos būsenos dydžio pokytis yra:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^m \frac{u_i}{\sigma_i} v_{n+k-1,i} \quad (3)$$

Čia, $v_{n+k-1,i}$ – $n + k - 1$ elementas v_i , kairysis savasis vektorius.

Todėl, k -ojo mazgo jautrumas įtampai yra:

$$\frac{dU_k}{dQ_k} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i} u_{n+k-1,i} v_{n+k-1,i} = \sum_{i=1}^m \frac{P_{n+k-1,i}}{\sigma_i} \quad (4)$$

Čia, apibrėžiamas p_{ki} , kuris vadinamas k -tojo būsenos kintamojo dalyvavimo i -ajam būdingajam režimui σ_i koeficientu. Iš (4) lygties galime spręsti, kad:

- Kuo didesnis p_{ki} , tuo didesnę k -tojo mazgo įtampos jautrumą lemtų režimas σ_i .
- Palyginę to paties režimo σ_i indėlį į skirtingų mazgų įtampos jautrumą, galime nustatyti pagrindinius mazgus, turinčius stiprią koreliaciją su charakteringuoju režimu σ_i . Jei sistema, veikiamą šio režimo, yra nestabili, mazgai, turintys stiprią koreliaciją, sudaro sistemos, veikiamos šio nestabilaus režimo, nestabilumo sritį.

Savųjų verčių analizės metodas iš esmės yra išplėstinė įtampos jautrumo analizė Jakobiano matricioje. Pagal dalyvavimo koeficientų dydžio tvarką galima rasti mazgus, turinčius stiprų ryšį su minimaliu charakteristiniu režimu. Šie mazgai apibrėžiami kaip pagrindiniai mazgai, sudarantys silpną sistemos stabilumo sritį, kuri dažniausiai laikoma geriausia vieta reaktyviosios galios kompensavimo įrenginiams įrengti [3, 16].

1.6.3. Energijos nuostolių jautrumas indeksas

Elektros energijos sistemos įtampos veikimo lygis yra glaudžiai susijęs su galios nuostoliais perdavimo tinkle. Vienas iš sistemos įtampos griūties požymių yra staigus sistemos galios nuostolių

padidėjimas [17]. Kai didėjant apkrovai sistema pasiekia kritinį tašką, galios nuostolių jautrumas artėja prie begalybės. Todėl galios nuostolių jautrumas gali būti naudojamas kaip įtampos nestabilumo arba įtampos griūties požymis. Galios nuostoliai tinkle turėtų būti lygūs visų sistemos mazgų tiekiamos galios sumai:

$$S_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i(Y_{ij}U_j) \quad (5)$$

Sudarant lygčių sistema išskiriant galios nuostolius į aktyviosios ir reaktyviosios galios nuostolius gaunama:

$$\begin{cases} P_{loss} = f(\delta, U) \\ Q_{loss} = h(\delta, U) \end{cases} \quad (6)$$

arba

$$\begin{cases} \frac{dP_{loss}}{dP} = \frac{\sigma P_{loss}}{\sigma \delta} \frac{\sigma \delta}{\sigma P} + \frac{\sigma P_{loss}}{\sigma \theta} \frac{\sigma \theta}{\sigma P} \\ \frac{dQ_{loss}}{dQ} = \frac{\sigma P_{loss}}{\sigma \delta} \frac{\sigma \delta}{\sigma Q} + \frac{\sigma P_{loss}}{\sigma \theta} \frac{\sigma \theta}{\sigma Q} \end{cases} \quad (7)$$

Išreiškus matricinėje formoje gaunama:

$$\begin{bmatrix} \frac{dP_{loss}}{dP} \\ \frac{dP_{loss}}{dQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\sigma \delta}{\sigma P} & \frac{\sigma U}{\sigma P} & 1 \\ \frac{\sigma \delta}{\sigma Q} & \frac{\sigma U}{\sigma Q} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sigma P_{loss}}{dP} \\ \frac{\sigma P_{loss}}{dQ} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pagal (8) lygtį galima nustatyti galios nuostolių jautrumą $\frac{dP_{loss}}{dP}$ ir $\frac{dP_{loss}}{dQ}$; panašiai galima gauti reaktyviosios galios nuostolių jautrumą $\frac{dQ_{loss}}{dP}$ ir $\frac{dQ_{loss}}{dQ}$. Iš formulės matyti, kad galios nuostolių jautrumo rodiklis glaudžiai susijęs su Jakobiano matrica. Kai sistema yra arti įtampos žlugimo, Jakobiano matricos determinantas artėja prie 0, tada galios nuostolių jautrumas artėja prie begalybės. Todėl galios nuostolių jautrumas gali būti naudojamas sistemos įtampos stabilumui įvertinti [18].

Kiekvienas iš šių metodų turi savo privalumų ir trūkumų, todėl dažniausiai naudojami keliuose stadijose, siekiant gauti išsamesnį ir tikslesnį įtampos stabilumo vertinimą. Bendrai, įtampos stabilumo analizė padeda suprasti sistemos elgseną skirtingomis EES veikimo sąlygomis ir gali padėti priimti sprendimus siekiant išlaikyti elektros tinklo patikimumą.

1.7. Paskirstytos generacijos šaltinių poveikis įtampos stabilumui

Pastaruoju metu pastebima, kad elektros tinklai vis dažniau jungiami su paskirstytosios energijos šaltiniais, kaip saulės ar vėjo elektrinės. Iš pradžioje saulės elektrinės buvo naudojamos tik individualiems vartotojų poreikiams patenkinti, tačiau dabar statomi didelių galių saulės elektrinių parkai, kurie yra prijungiami prie elektros tinklo, todėl juos reiktų vertinti kaip nepriklausomus generavimo šaltinius [19]. Saulės elektrinės yra prijungiamos prie tinklo naudojant nuolatinės srovės keitiklius, kurių galios faktorius yra lygus vienetui, todėl jie į tinklą generuoja tik aktyviają elektros energiją, tačiau, kai į tinklą tiekama tik aktyvioji elektros energija aptinkamos kitos problemos. Pavyzdžiui, mažai apkrautos tinklo oro linijos gali generuoti reaktyviają energiją ir padidinti įtampą tinkle. Mažai apkrautumo tiekimo linijos dažniausiai būna būtent vasara, kai saulės elektrinių parkai generuoja daugiausiai.

Vėjo elektrinių parkai yra statomi visame pasaulyje, dauguma jų naudoja dvigubo maitinimo indukcinis generatorius (*angl. double fed induction generator DFIG*). Lyginant su kitų tipų generatoriais, šie turi bene daugiausiai privalumų išlaikant stabilią sistemos įtampą [20]. DFIG generatoriai gali valdyti aktyviosios, reaktyviosios galios tiekimą bei greitį. Tačiau, dažniausiai vėjo elektrinės dėl aplinkosauginių, socialinių ir kitų reikalavimų yra nutolę nuo vartotojų. Įprastai prie

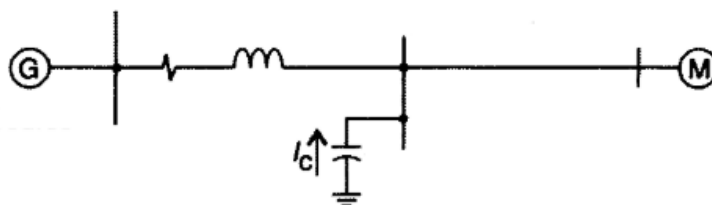
elektros tinklo vėjo elektrinės prijungiamos požeminiais kintamos srovės kabeliais, dideliais atstumais klojami kabeliai indukuoja dideles talpines srovės, kurias reikia kompensuoti.

1.8. Kompensaciniai įrenginiai

Kompensaciniai įrenginiai EES naudojami pagerinti elektros energijos tiekimo patikimumą, padidinant tinklo atsparumą perkrovoms ir gedimams. Kompensaciniais įrenginiais gali būti reguliuojamas įtampos lygis sistemoje, taip siekiant išlaikyti įtampą tam tikrose ribose, kad būtų galima patikimai tiekti elektros energiją vartotojams. Toliau glaustai apžvelgiami pagrindiniai kompensaciniai įrenginiai kaip sprendimo būdas, įtampos stabilumui elektros energetikos sistemoje gerinti.

1.8.1. Šuntiniai kondensatoriai

Šuntiniai kondensatoriai, dar vadinami kondensatorių baterijomis arba galios kondensatoriais, yra elektros įrenginys, naudojamas EES talpinei reaktyviajai galiai palaikyti ir galios faktoriui pagerinti.

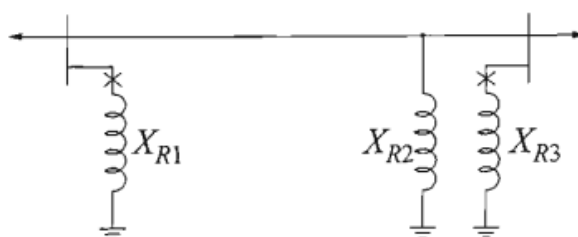


3 pav. Principinė kondensatoriaus pajungimo schema

Įrenginiai į sistema jungiami lygiagrečiai su apkrovomis arba sistema. Jie generuoja talpinę reaktyviąją galią, kuri stabilizuoja sistemoje esančią induktyviąją reaktyviąją galią, taip pagerindama galios koeficientą ir sumažindama linijos nuostolius [21]. Kondensatorių, priklausomai nuo dydžio, sudaro atskiri kondensatorių blokai jungiami lygiagrečiai tarpusavyje.

1.8.2. Šuntiniai reaktoriai

Reaktoriai – reaktyvią galią vartojantis įrenginys. Paprastai reaktoriai naudojami tam, kad galėtų stabilizuoti įtampą ir kompensuoti reaktyviąją galią tinkle [22]. Šuntuojantys reaktoriai jungiami lygiagrečiai su ilgomis elektros perdavimo linijomis arba pastotėmis.

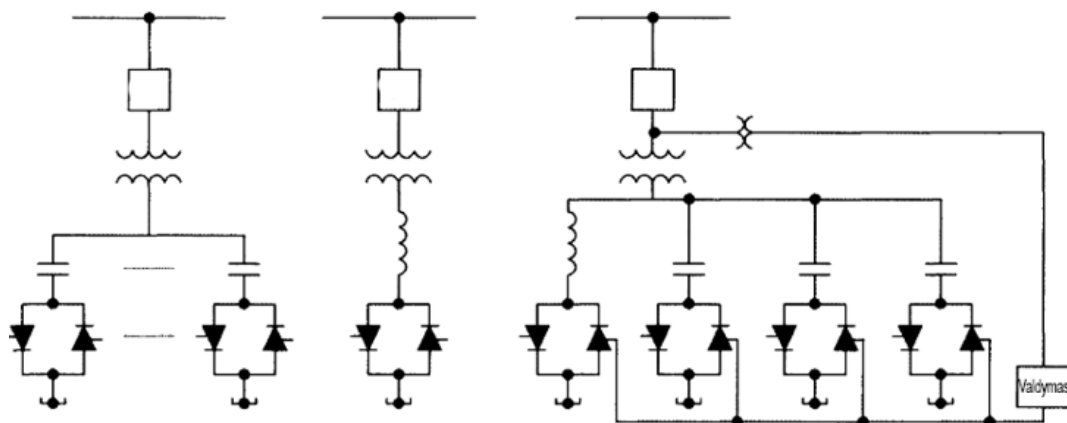


4 pav. Šuntinio reaktoriaus principinė pajungimo prie perdavimo linijos (X_{R2}) ir pastotės šynų (X_{R1} , X_{R3}) schema

Reaktoriai gali būti įrengiami pastotėse, kurias aptarnauja ilgos perdavimo linijos, požeminiai kabeliai mažos apkrovos laikotarpiais dėl linijos padidėjusios talpos (*Ferranti efektas*) [23], taip suvartodami perteklinę talpinę reaktyviąją galią ir sumažindami įtampos svyravimus bei palaikydami sistemos stabilumą. Šuntiniai reaktoriai savo konstrukcija panašūs į galios transformatorius, jie turi tik vieną apviją ant šerdies su oro tarpais panardintais alyvoje.

1.8.3. SVR – Statinis reaktyviosios galios kompensatorius

Statinis VAR kompensatorius (*angl. Static VAR compensator, SVC*) sudaro šuntinių reaktorių ir kondensatorių kombinacija su valdančiais elementais, tiristoriais.



5 pav. SVR įrenginio konfigūracijos

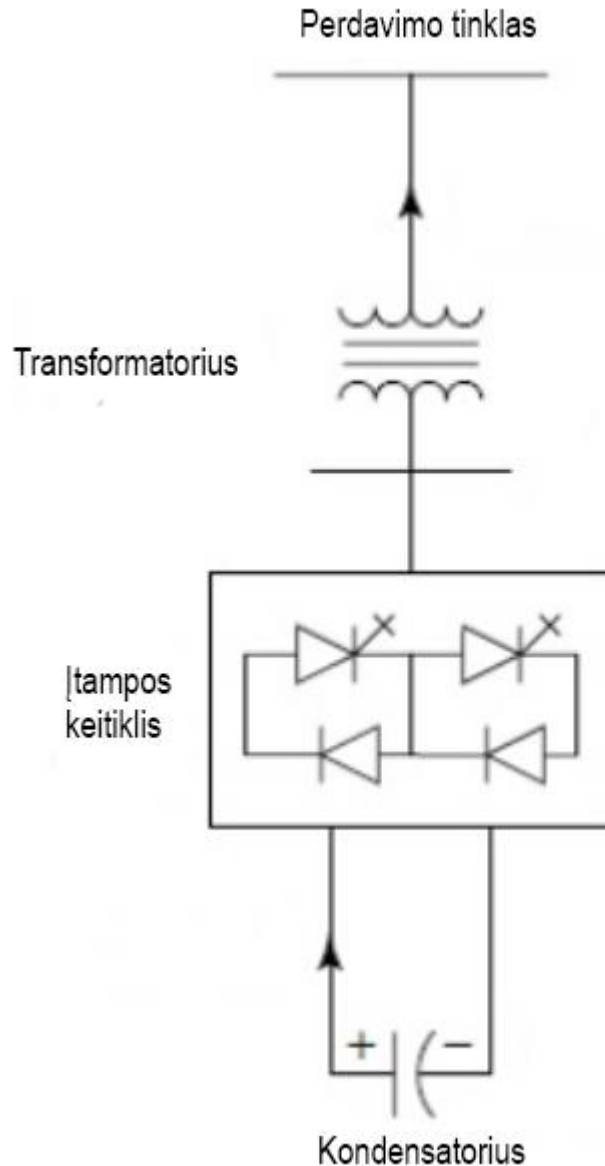
Dėl valdymo elemento šie įrenginiai yra patrauklūs, nes turi galimybę automatiškai reguliuoti įtampa nustatytose ribose. Jais sprendžiamos 2 tipų kompensavimo problemos, su kuriomis paprastai susiduriama praktinėse elektros energijos sistemose [24]:

- 1) apkrovos kompensavimas, kai paprastai reikalaujama sumažinti didelių ir svyruojančių apkrovų reaktyviosios galios poreikį ir subalansuoti galią, imamą iš tiekimo linijų;
- 2) EES perdavimo linijų įtampos palaikymas tam sistemos mazge, reaguojant į apkrovos ir gamybos sutrikimus.

SVR kompensavimo tikslai yra padidinti elektros energijos sistemos stabilumo ribą, sumažinti įtampos svyravimus esant apkrovos svyravimams ir apriboti didelių trikdžių sukeltus įtampos nuokrypius.

1.8.4. STATCOM – Statinis sinchroninis kompensatorius

Statinis sinchroninis kompensatorius (*angl. Static synchronous compensator, STATCOM*) sudaro įtampos keitiklis, konvertuojantis nuolatinę įtampą į kintamą, ir nuolatinė srovės kondensatorius. Pagrindinis jo tikslas - užtikrinti greitai veikiantį, tikslų ir reguliuojamą reaktyviosios galios kiekį kintamosios srovės sistemos tinkle. STATCOM tai atlieka keisdamas kintamosios srovės pusę tekančios srovės reaktyviosios sudedamosios dalies dydį ir poliškumą. Tai leidžia STATCOM reguliuoti reaktyviosios galios, keičiamos su kintamosios srovės elektros sistemomis, kiekį ir judėjimo kryptį [25].



6 pav. Principinė STACOM įrenginio schema

STATCOM daugiausia naudojami galios srautui valdyti, reaktyviajai galiai kompensuoti ir sistemos stabilumui didinti elektros energijos perdavimo tinkluose, o skirstomuosiuose tinkluose elektros energijos kokybei ir tiekimo patikimumui gerinti. STATCOM išėjimo trifazė kintamoji įtampa sinchronizuojama su prijungto elektros tinklo trifazė kintamąja įtampa ir prijungiama šuntavimo būdu prie sisteminio mazgo. STATCOM gali užtikrinti greitą reakcijos greitį ir simetriškai pirmaujančią arba atsiliekančią reaktyviąją srovę, taip reguliuodamas perdavimo linijos reaktyviąją galią, subalansuodamas perdavimo linijos įtampą ir palaikydamas statinę arba dinaminę perdavimo linijos įtampą leistinose sistemos ribose. Be to, jo sklandus ir nuolatinis valdymas gali iki minimumo sumažinti pasyviųjų įtaisų sukeltus įtampos svyravimus, o tai padeda didinti elektros energijos sistemos stabilumą.

2. Metodinė dalis

2.1. Elektros energetikos tinklo modelio elementų sudarymo principas

Elektros energetikos tinklą sudaro nemažai funkcinų elementų, kurie gali skirtis savo struktūra, savybėmis ar veikimo principu. Elektros energetikos tinklo modeliui sudaryti reikia žinoti kaip veikia kiekvienas iš modeliujamų elementų ir kaip parenkami jų parametrai, kad tinklo modelis būtų realus ir veiktų tinkamai. Kadangi, tyrimo metu tinklo modelis sudarytas *Siemens PSS/E* programiniu įrankiu, jo naudojimo principais vadovaujantis apžvelgiami pagrindinių sistemos elementų sudarymas.

2.1.1. Elektros perdavimo linija

Fizikiniais dydžiais aprašant elektros perdavimo linija nusako jos varžą, kuri priklauso nuo laidininko savybių. Liniją aprašančius parametrus galima apibendrinti lygtimis [26]:

$$Z = R + j\omega X; \quad (9)$$

$$Y = G + j\omega B; \quad (10)$$

Čia, R – aktyvioji varža, X – Reaktyvioji varža, Z – kompleksinė varža, Y – laidis, G – skersinis laidis, B – talpinis laidis.

Modeliuojant PSS/E programinėje įrangoje reikalinga nurodyti šias reikšmes:

2 lentelė. Elektros linijos pagrindiniai parametrai PSS/E programinės įrangos aplinkoje

Elektros linijos parametras PSS/E programinėje įrangoje	Reikšmė
Line R	linijos aktyvioji varža
Line X	linijos reaktyvioji varža
Charging B	linijos talpinis laidis
Charging G	linijos skersinis laidis
Rate A	linijos maksimali leistinoji srovė

2.1.2. Galios transformatorius

Modeliuojant galios transformatorius naudojamos realių transformatorių technine dokumentacija ar transformatoriaus pasais. Galios parametrus galima apibendrinti lygtimis:

Modeliuojant PSS/E programinėje įrangoje reikalinga nurodyti šias reikšmes:

3 lentelė. Galios transformatoriaus pagrindiniai parametrai PSS/E programinės įrangos aplinkoje

Elektros linijos parametras PSS/E programinėje įrangoje	Reikšmė
Winding N1 (kV)	Pirminės apvijos įtampa
Winding N2 (kV)	Antrinės apvijos įtampa
Winding MVA	Apvijos galia, bazinė galia
Specified R	Aktyvioji transformatoriaus varža
Specified X	Reaktyvioji transformatoriaus varža

2.1.3. Generatorius

Modeliuojant generatorius įprastai taip pat naudojami parametrai, randami techninėje generatoriaus dokumentacijoje. Sudarant statinį elektros sistemos modeli, PSS/E programiniame pakete naudojamas bendras sinchroninio generatoriaus elementas (*angl. synchronous generator*),

kuris gali būti aprašytas ir pritaikytas kaip bet kuris generuojantis šaltinis. Pagrindinės reikšmės, kurias reikia nurodyti modeliuojant generatorių:

4 lentelė. Generatoriaus pagrindiniai parametrai PSS/E programinės įrangos aplinkoje

Elektros linijos parametras PSS/E programinėje įrangoje	Reikšmė
Pgen (MW)	Generatoriaus generuojama aktyvioji galia
Qgen (MVar)	Generatoriaus generuojama reaktyvioji galia
Pmax (MW)	Aktyviosios galios maksimali generacijos riba
Pmin (MW)	Aktyviosios galios minimali generacijos riba
Qmax (MVar)	Reaktyviosios galios maksimali generacijos riba
Qmin (MVar)	Reaktyviosios galios minimali generacijos riba
X source	Generatoriaus reaktyvioji varža
Mbase (MVA)	Generatoriaus pilnutinė galia

2.2. Newton-Raphson galios srautų skaičiavimų metodika

Newton-Raphson yra iteraciniais skaičiavimais pagrįsta metodika. Energetikos sektoriuje šis metodas naudojamas galios srautų analizei elektros sistemose atlikti.

Šia metodika aprašomos netiesinių galios srautų lygtys, kurios išreiškia aktyviosios P ir reaktyvios Q galios pusiausvyrą kiekviename sistemos mazge [27]. Norint išreikšti galios srauto lygtis, reikalinga apibrėžti fazoriaus įtampą ir srovę mazge i:

$$V_i = V_i e^{j\theta_i} \quad (1)$$

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (2)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3)$$

Čia V_i – įtampos didumas mazge i , θ_i – fazinis kampas mazge i , G_{ij} – mazgų ij tarpusavio laidumo realioji dedamoji, B_{ij} – mazgų ij tarpusavio laidumo menama dedamoji.

Srovės mazge i:

$$I_i = \sum_{j=1}^i Y_{ij} V_j \quad (4)$$

Tada kompleksinė galia mazge i bus:

$$S_i = V_i I_i = V_i \left(\sum_{j=1}^i Y_{ij} V_j \right) \quad (5)$$

Panaudojus (1) (2) ir (3) formules pastarojoje, gaunama išraiška:

$$s_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j e^{j\theta_{ij}} (G_{ij} - B_{ij}) = \sum_{j=1}^n V_i V_j (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) (G_{ij} - B_{ij}) \quad (6)$$

Iš (6) lygties galima išsireikšti aktyviosios ir reaktyviosios galios srautų lygtis:

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (7)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (8)$$

čia P_i – aktyviosios galios srautas mazge i , Q_i – reaktyviosios galios srautas mazge i ,
 n – mazgų skaičius sistemoje.

Iš (7) ir (8) matoma, kad aktyviosios P ir reaktyviosios Q galios srautai kiekviename tinklo mazge priklauso nuo įtampos V ir fazinio kampo θ . Šių parametrų konvergavimas *Newthon-Raphson* metodikoje aprašomas naudojantis Jakobiano matrica (*angl. Jacobian matrix*) [28]:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Jakobiano matrica sudaryta iš dviejų dalinių išvestinių, kurių viena įtampos lygio pokytis, antroji – fazinio kampo pokytis. Jakobiano matrica aprašo kaip kinta aktyvioji ir reaktyvioji galia kiekviename elektros tinklo mazge pasikeitus įtampos lygiui ir faziniam kampui.

Metodikoje naudojamos kintamųjų funkcijos ir jų išvestinių skaičiavimai, kad būtų pasiekti kuo tikslesni sprendiniai. Dėl savo konvergavimo savybių, pritaikomumo programiniuose paketuose ir lankstaus pritaikymo bet kokio dydžio sistemoms, tai yra viena plačiausiai naudojamų galios srautų skaičiavimo metodikų.

2.3. Įtampos jautrumo koeficientas

Įtampos jautrumo koeficientas S_i yra matematinė išraiška, kuri parodo tam tikrų sisteminių parametrų, tokiu kaip galios srautai ar įtampos, pasikeitimo greitį, atsižvelgiant į santykinai nedideli įtampos pokytį mazge i . Šiuo koeficientu vertinamas elektros sistemos jautrumas įtampos pokyčiams, konkrečiame mazge. Įtampos jautrumo koeficientas plačiai naudojamas elektros energetikos sistemų įtampos valdymo strategijoms, įtampos stabilumo, energijos srautų, nenumatytų atvejų (*angl. Contingency*) analizėms atlikti [29].

Įtampos jautrumo koeficientas mazge i išreiškiamas kaip:

$$K_i = \frac{\partial X}{\partial U} \quad (10)$$

čia K_i – yra įtampos jautrumo koeficientas mazge i ,

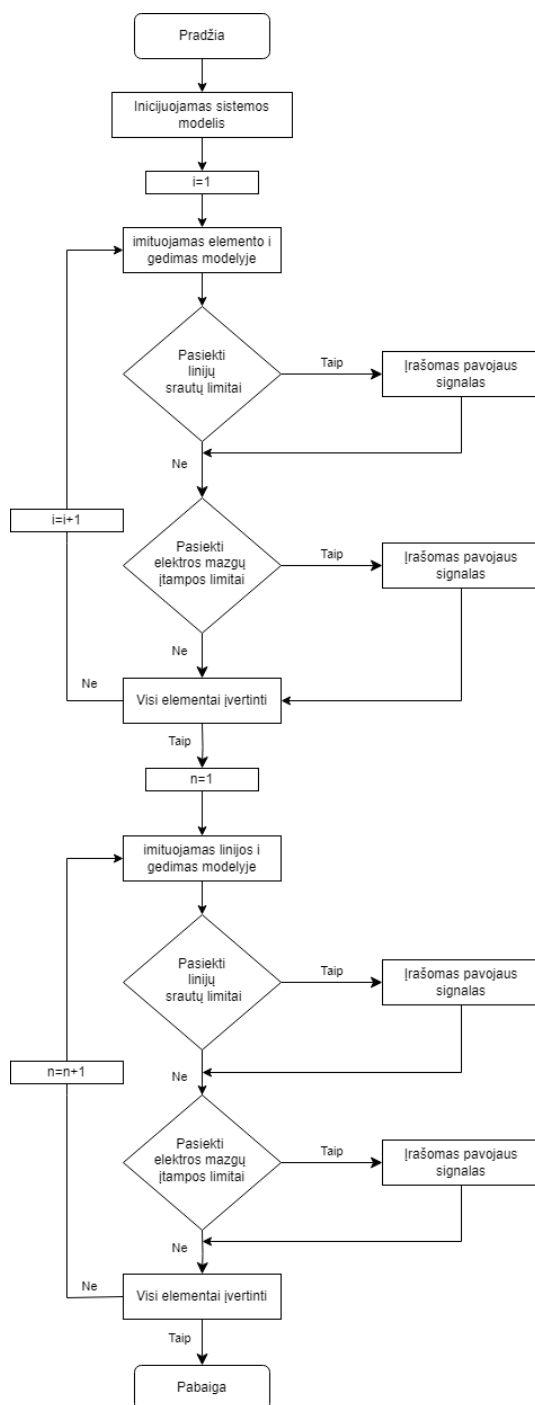
∂X – yra analizuojamas galios parametras,

∂U_i – yra įtampos lygis mazge i .

Kuo jautrumo koeficientas didesnis, tuo labiau sistema yra jautri įtampos pokyčiams tinkle. Jautrumo koeficientas apibrėžia, kaip įtampos pokyčiai konkrečiame mazge i , keičia sistemos parametrus kituose elektros mazguose. Tai naudingas įrankis padedantis inžinieriams, elektros tinklų operatoriams identifikuoti kritinius sisteminius elektros mazgus, kur įtampos svyravimai gali ženkliai paveikti sistemos veikimą.

2.4. Nenumatytų atvejų analizė

Elektros energetikos sistemos patikimumas yra labai svarbus sistemos veikimo procese, ypač didesnėse sistemose, kuriose gali atsirasti nenumatytų trikdžių ar pertraukimų pavojus. Tokiose sistemose turėtų būti pakankamai gamybinių sistemų, kad būtų patenkintas vartotojų poreikis ir patikima infrastruktūra galinti nepertraukiamai teikti paslaugas. N-1 principas yra esminis energetikos sistemų saugumo ir patikimumo principas, ypač svarbus elektros tinklu operatorių veikloje ir elektros sistemos analizėje [30]. Elektros tinklų operatoriai N-1 principą taiko siekdami užtikrinti sisteminę elektros tiekimo rezervą, atliekant planinius atjungimus ar analizuodami galimus atjungimo scenarijus. Galima sakyti, kad elektros energijos sistemos struktūra turi veikti taip, kad atjungus ar pašalinus vieną iš esminių sistemos elementų, kaip tiekimo linija ar galios transformatorius, ši toliau galėtų tinkamai veikti ir tiekti elektros energiją vartotojams [31]. Elektros perdavimo linijų, generuojančių šaltinių gedimai yra labiausiai paplitę gedimai elektros energijos sistemose [32]. Dėl besikeičiančių sistemos veikimo sąlygų, gedimų ar kitų nenumatytų pertraukimų elektros tinkluose pablogėja sąlygos tiekti patikimą elektros energiją vartotojams, todėl patikimumą reikia nuolat tikrinti ir stebėti. Visus įmanomus gedimus ištirti gali būti labai sudėtinga, nes per ganėtinai trumpą laiką reikia turėti rezultatus, kad būtų galima priimti strateginius sprendimus. Siekiant išspręsti šią problemą, buvo sukurtas N-1 principu paremtas programinis algoritmas, vadinamas nenumatytų atvejų analize (*angl. Contingency analysis*), kuris nuosekliai modeliuoja gedimų įvykius, kol išnagrinėjami visi galimi gedimai [33]. Nenumatytų atvejų analizės veikimą galima išreikšti logine bloku diagrama:



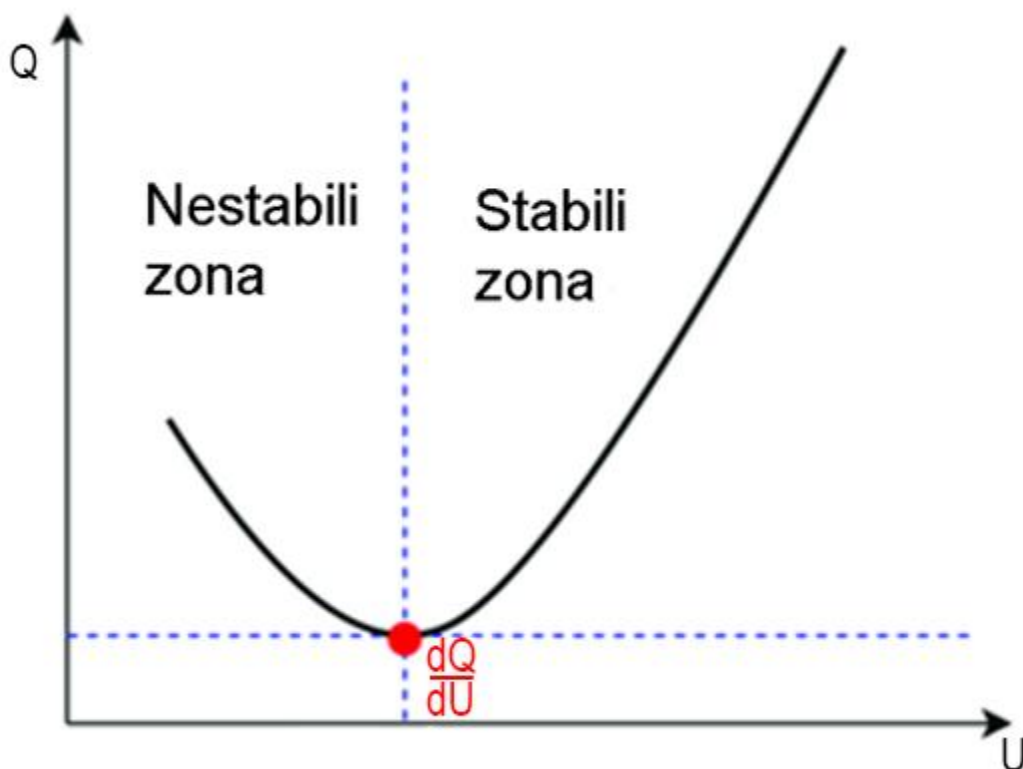
7 pav. Nenumatytų atvejų analizės (*angl. Contingency analysis*) programinis veikimo algoritmas

Kitai sakant, tai yra programinis algoritmas skirtas įvertinti ir apskaičiuoti galimų gedimų poveikius elektros sistemoje, galinčius įvykti artimiausioje ateityje. Naudojantis šia analize, galime išskirti 3 įvykio tipus [34, 35]:

- 1) Rizikos nėra – Elektros energetikos sistema geba perbalansuoti apkrovas po nenumatyto gedimo be perkrovos;
- 2) Rizikingas – Vienas ar keletas iš sistemos elementų, kaip tiekimo linija ar transformatorius, dirba su didele perkrova ir yra rizika juos pažeisti ar visiškai sugadinti;
- 3) Kritinis – Sistema tampa nestabili, vyksta tinklo griūtis.

2.5. QU kreivių metodas

Reaktyviosios galios – įtampos (QU) kreivė yra vienas iš elektros sistemų stabilumo nustatymo metodų [36]. QU kreivėje pateikiami santykiai tarp reaktyviosios galios ir įtampos elektros sistemoje, taip parodanti kaip reaktyvioji galia kinta keičiantis įtampos lygiui ir atvirkščiai.



8 pav. Reaktyviosios galios – įtampos (QU) kreivė

QU kreivės metodu tiriamas įtampos stabilumas elektros sistemose, pritaikant galios srautų skaičiavimo rezultatus. Dešinioji kreivės pusė 3 paveiksle, kur $\frac{dQ}{dU} > 0$ yra stabilumo zona, rodanti normalų elektros sistemos darbą, kairioji pusė, kur $\frac{dQ}{dU} < 0$ yra nestabilumo zona, rodanti normalų elektros sistemos darbą. Kreivės žemiausias taškas, kur $\frac{dQ}{dU} = 0$ yra kritinis įtampos stabilumo taškas dar vadinamas griūties riba (*angl. Collapse point*). Iš QU kreivių galima nustatyti reaktyviosios galios atsargą mazge. Jei žemiausias kreivės taškas yra virš U ašies ir kreivė nesikerta su ašimi, tai rodo, kad sistemoje nepakanka reaktyviosios galios. Jei reaktyviosios galios nėra, sistema negali veikti. Kad būtų išvengta įtampos griūties, reikia papildomai tiekti reaktyviają galią į elektros tinklą. Vertikalus atstumas tarp ribinio taško ir U ašies rodo neigiamą reaktyviosios galios atsargą, rodančią minimalią reaktyviają galią, kurią reikia tiekti į elektros tinklą. Jei ribinis taškas yra žemiau U ašies, susikirtimo taškas identifikuos nominalų sistemos veikimą, o vertikalė tarp ribinio taško ir U ašies reikš reaktyviosios galios atsargą sistemoje.

3. Tiriamoji dalis

Tyrimas atliekamas pasinaudojant teoriniu IEEE-9 elektros mazgų bandymų schema. Elektros energijos sistemos modelis sudaromas naudojantis programiniu įrankiu Siemens PSS/E. Tiriamasis teorinis elektros sistemos modelis modifikuojamas pritaikant šį, pagal Lietuvos perdavimo tinklo parametrus. Teorinis elektros tinklas modeliuojamas santykinų vienetų sistemoje. Naudojami matematinio modelio parametrai pateikiami sekančiai, lentelėse.

5 lentelė. Elektros sistemos linijų parametrai.

Linija		Linijos ilgis L, km	Aktyvioji varža R	Reaktyvioji varža X	Elektrinis laidumas B
Nuo	Iki				
BUS1	BUS2	5	0,079344	0,167544	1,1597
BUS1	BUS9	2	0,031738	0,067018	0,46388
BUS2	BUS4	4	0,063475	0,0134035	0,92776
BUS4	BUS6	2	0,031738	0,067018	0,46388
BUS6	BUS7	6,5	0,103315	0,217807	1,507600
BUS7	BUS9	2	0,031738	0,067018	0,46388

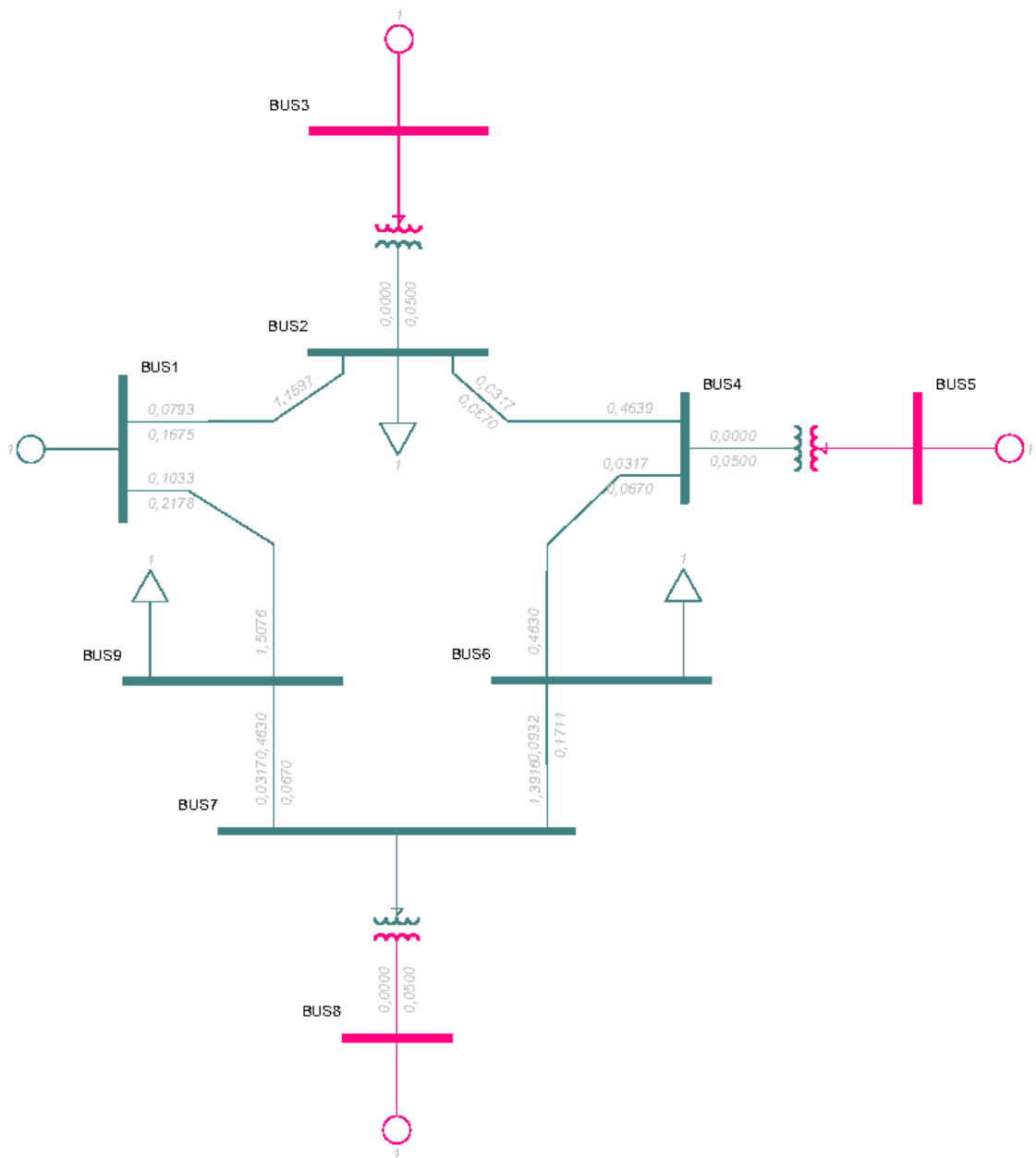
6 lentelė. Elektros sistemoje naudojamų generuojančių šaltinių (inverteriais pagrįstų) parametrai.

Generatorius	Galia P, MVA	Aktyviosios galios riba		Reaktyviosios galios riba		Galios koeficientas Cosφ
		P _{max}	P _{min}	Q _{max}	Q _{min}	
BUS3	20	9999	-9999	3	-3	0,85
BUS5	40	9999	-9999	3	-3	0,925
BUS8	20	9999	-9999	2	-2	0,85

7 lentelė. Elektros sistemos apkrovų parametrai.

Apkrova	Aktyvioji galia P, MW	Reaktyvioji galia Q, MVar	Q/P santykis
BUS2	32	6	0,187
BUS6	200	96,8	0,484
BUS9	125	50	0,4

Elektros tinklo modelio principinė schema pateikta 2 paveiksle.

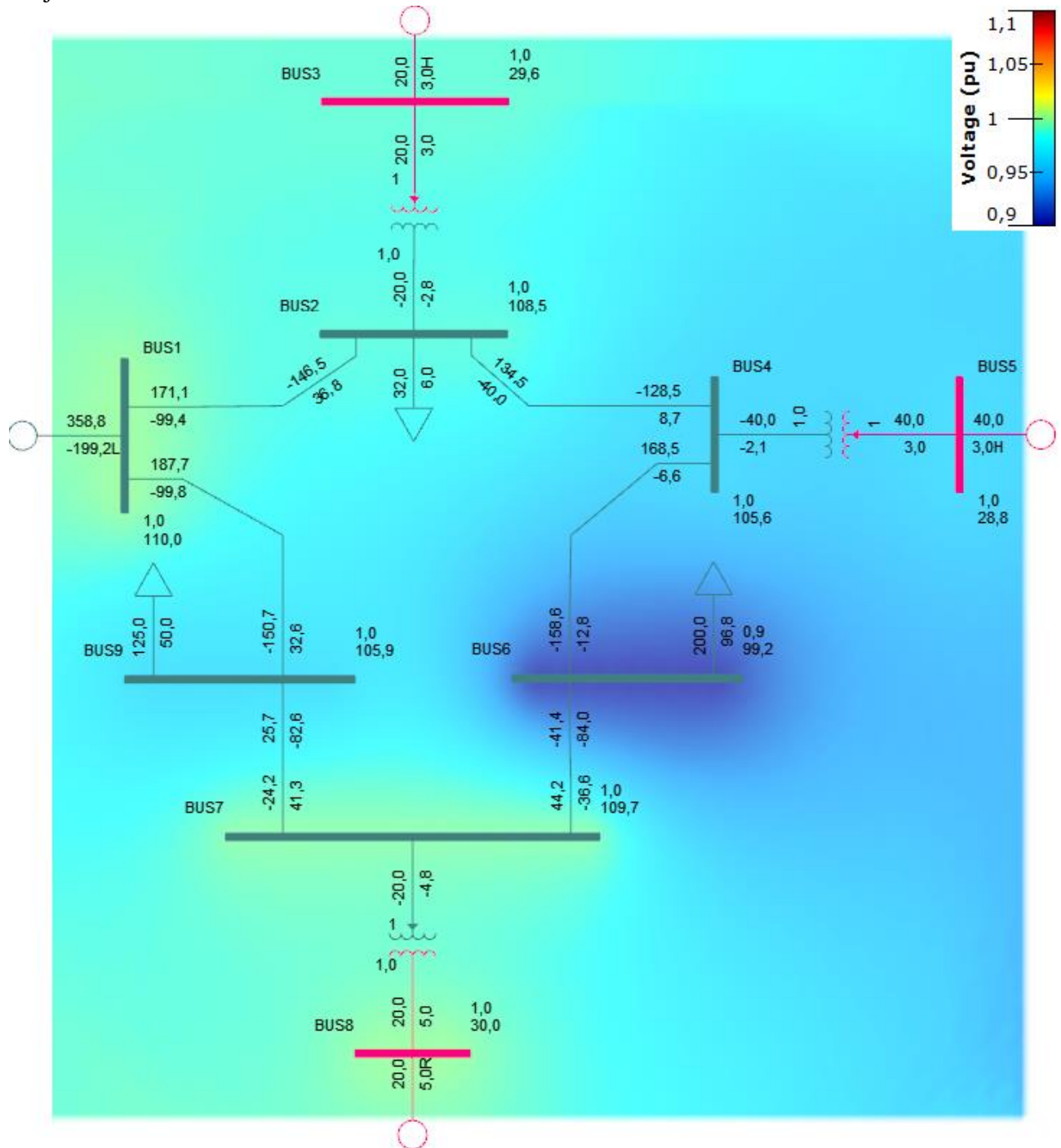


1

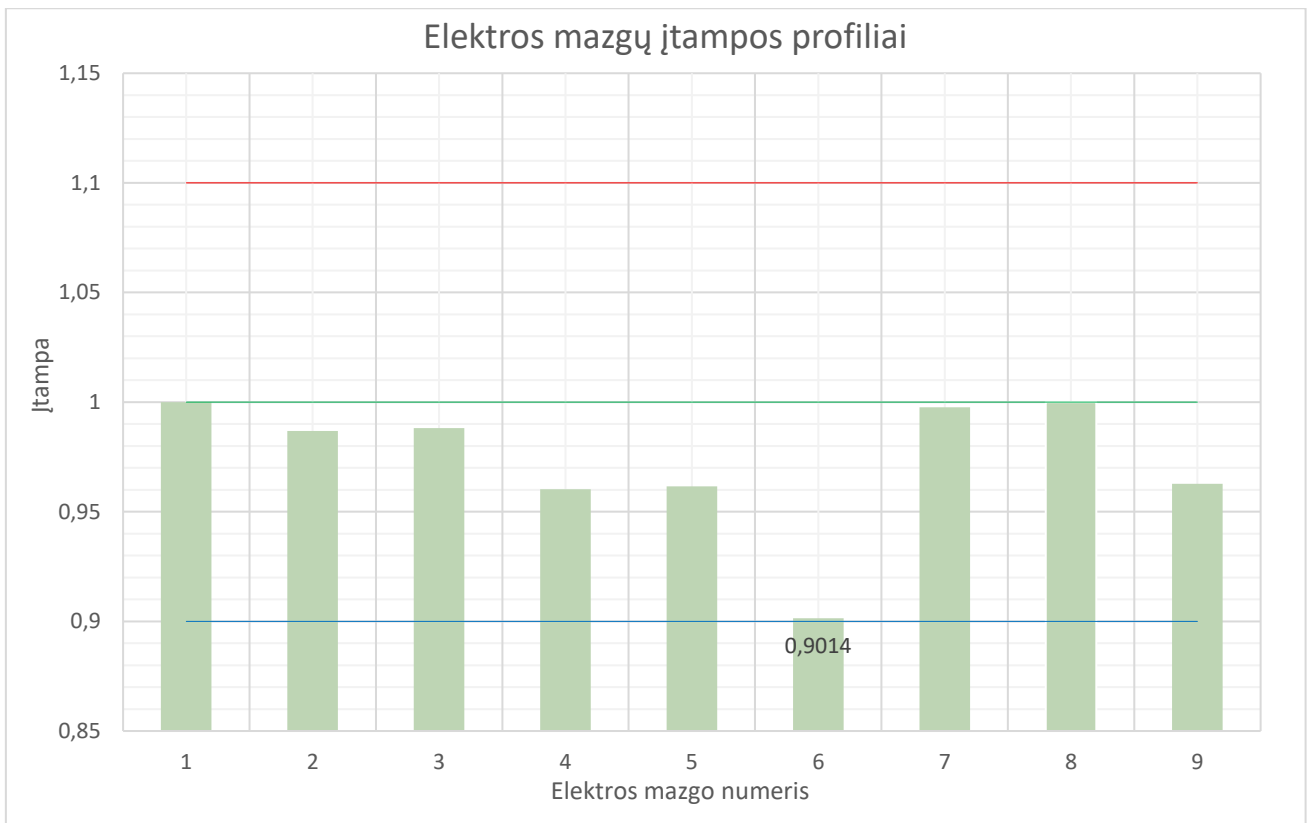
9 pav. Teorinio IEEE-9 elektros sistemos modelis

Teorinė IEEE-9 elektros tinklo sistema modeliuojama norint ištirti sisteminio elektros mazgo įtampos jautrumo ribą remiantis statiniais įtampos stabilumo metodais. Šiam tikslui pasiekti taikoma įtampos priklausomybės QU kreivių metodika bei N-1 principas, siekiant įvertinti ir kitus tinklo režimus. Atliekami galios srautų pasiskirstymo elektros sistemoje skaičiavimai remiantis *Newthon*-

Raphson metodu, naudojantis Siemens PSS/E programinės įrangos galios srautų (angl. Powerflow) funkcija.



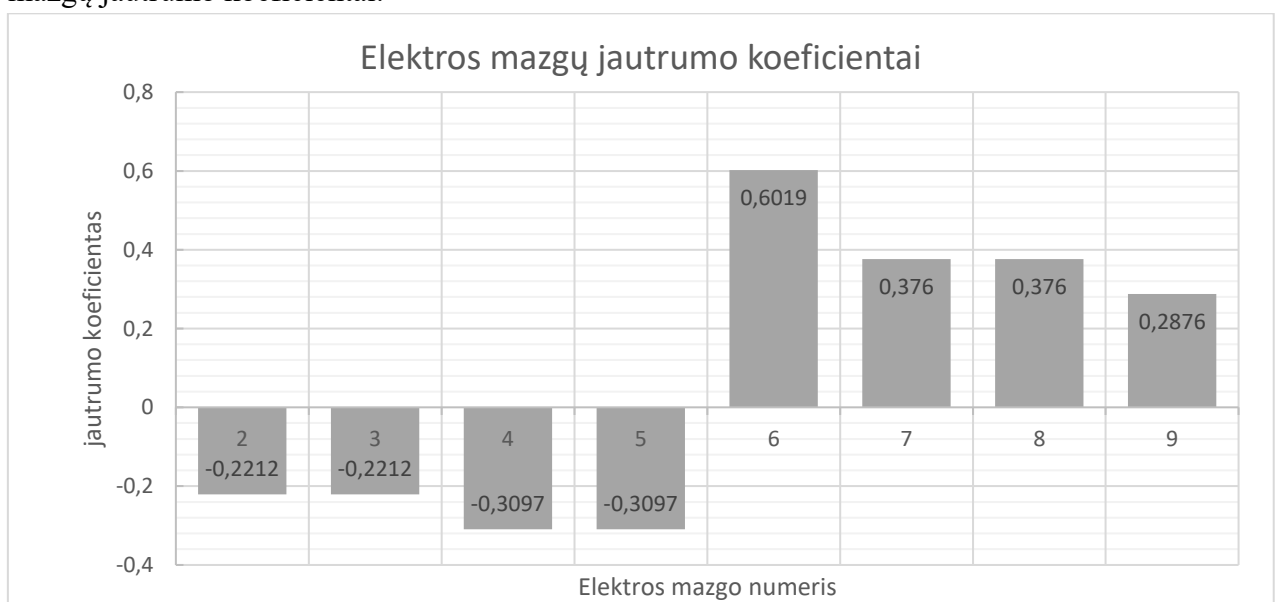
10 pav. Elektros tinklo modelio įtampų lygio pasiskirstymo schema



11 pav. Sisteminių elektros mazgų įtampos profiliai

3 ir 4 paveiksluose vaizduojami registruojami įtampos lygiai po galios srautų skaičiavimų analizuojamame tinklo modelyje. Galios srautų rezultatų suvestinė pateikta šio projekto prieduose (žr. 1 Priedą). Lietuvos perdavimo tinklo operatorius 110 kV įtampos elektros tinkle $\pm 10\%$ ribose be trikdžių gali veikti neribotai [37]. Ištyrus elektros tinklo įtampos lygius, nustatyta, kad elektros sistemoje arčiausiai operavimo ribų yra 6 sisteminis elektros mazgas su 0,9014 (99,15 kV) įtampos lygiu.

Užfiksavus elektros tinklo galios srautų rezultatus apskaičiuoti elektros tinklo sisteminių elektros mazgų jautrumo koeficientai.

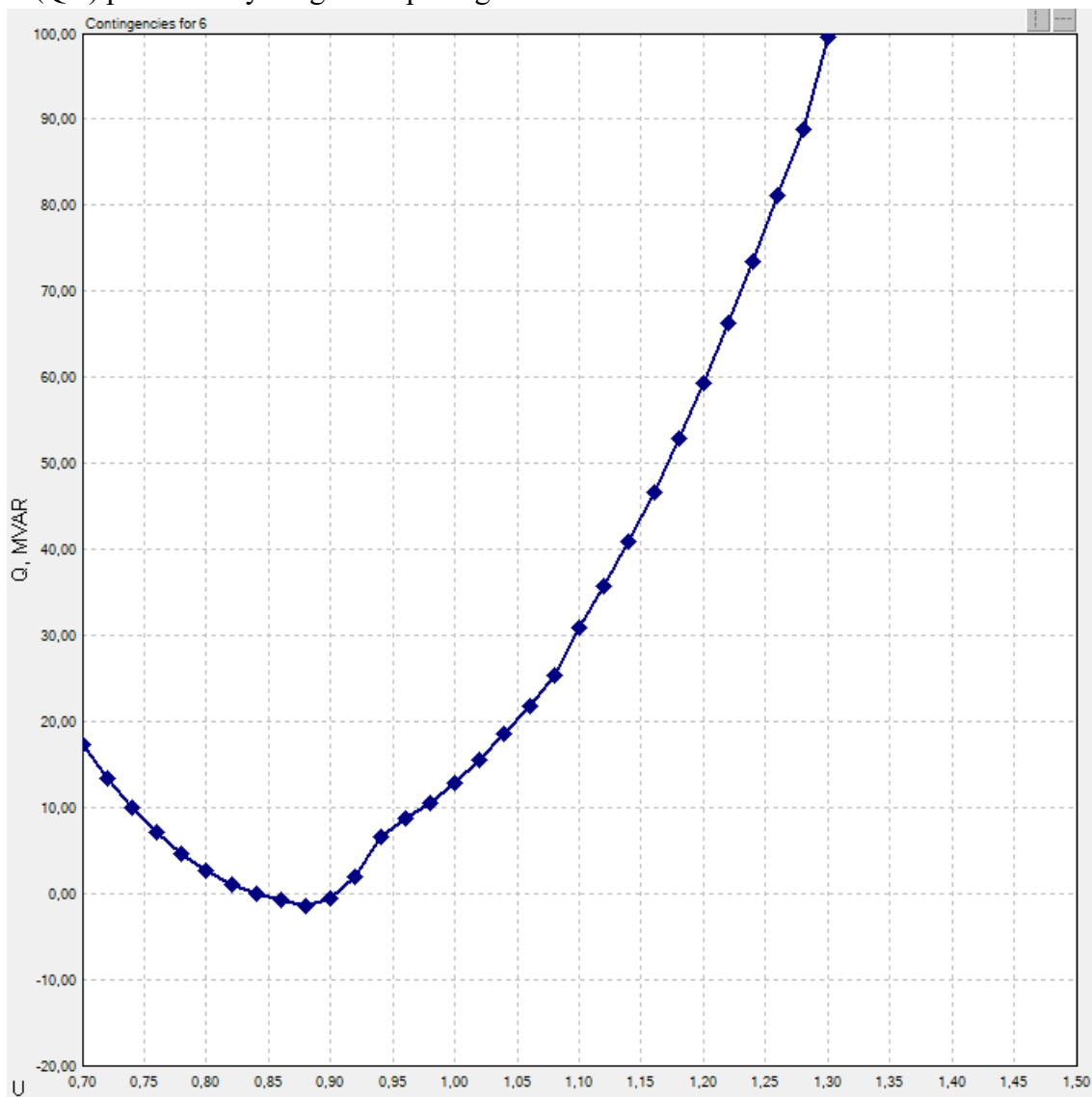


12 pav. Sisteminių elektros tinklo mazgų jautrumo koeficientai

Kaip ir minėta metodinėje dalyje, jautrumo koeficientas parodo, kokią įtaką daro įtampos pokyčiai konkrečiame tinklo mazge kitiems sistemos elementams. Rezultatai parodė, kad 6-ojo tinklo mazgo jautrumo koeficientas yra didžiausias (0,6019). Pokyčiai šiame mazge daro didžiausią įtaką kitiems elektros sistemos elementams, todėl tolimesniame tyrime buvo analizuojamas būtent 6-asis sisteminis elektros mazgas.

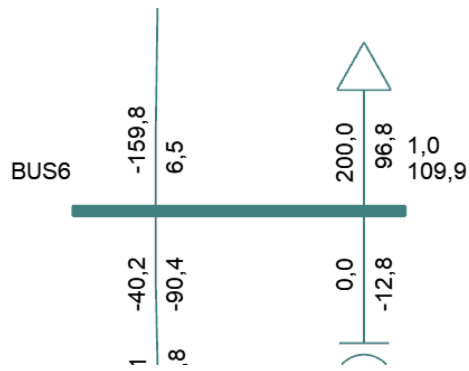
3.1. QU kreivių analizė

Ištyrus teorinio elektros tinklo galios srautų pasiskirstymą normaliu sistemos maitinimo režimu bei įdentifikavus tiriamąjį mazgą, PSS/E programinio paketo pagalba inicijuotas įtampos ir reaktyviosios apkrovos (QU) priklausomybės grafiko parengimas.

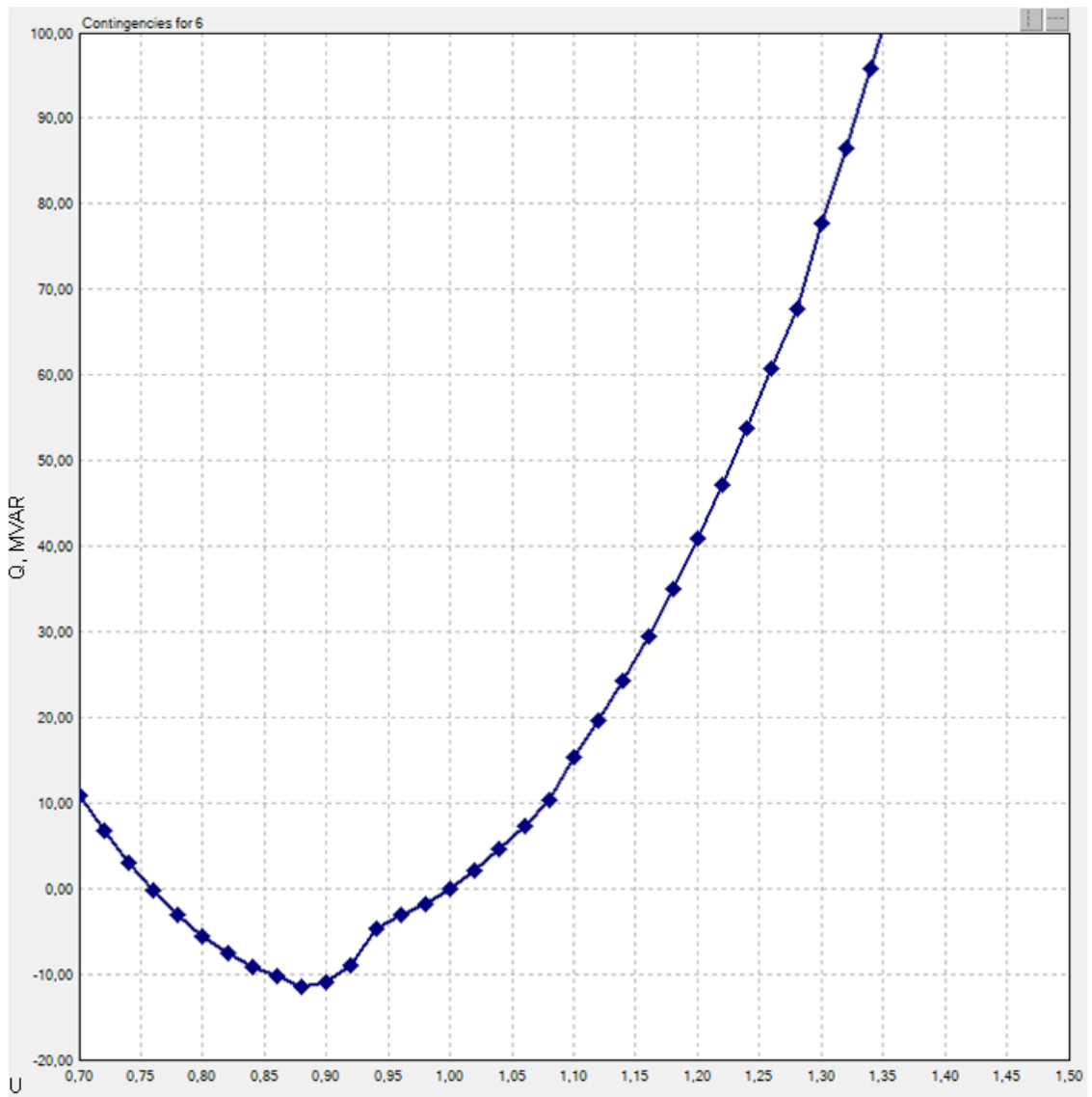


13 pav. 6-ojo elektros mazgo QU kreivė normaliu maitinimo režimu

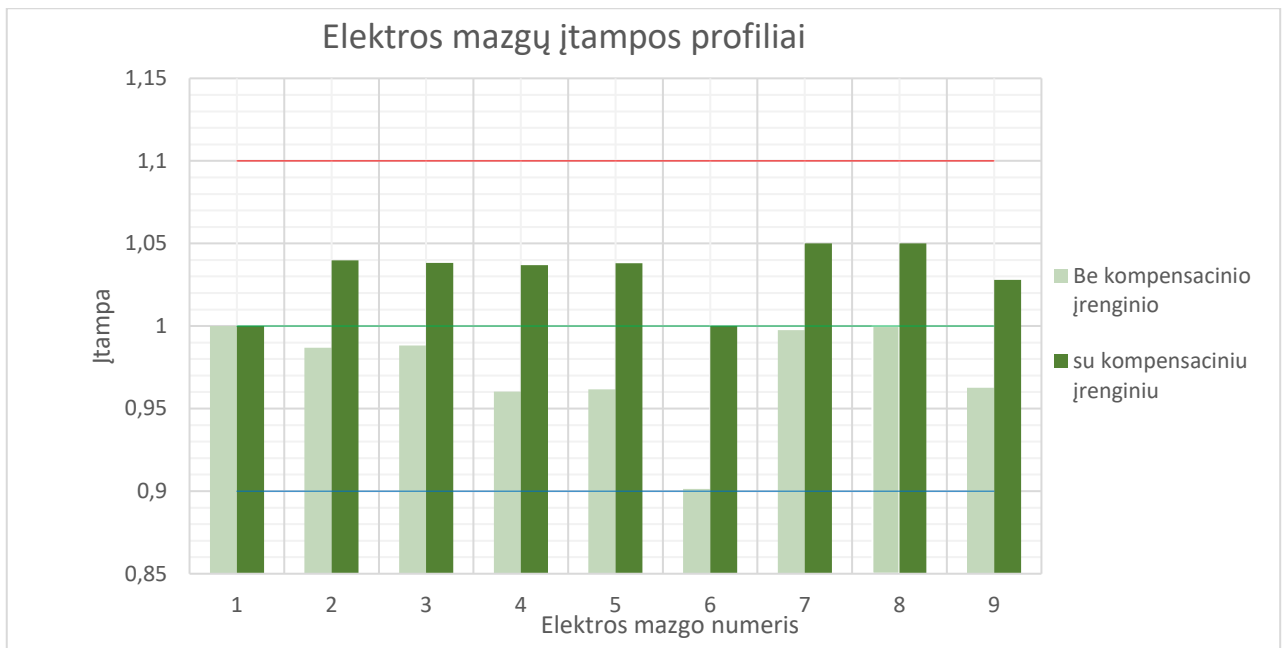
Ištyrus kreivę nustatyta, kad tiriamojo sistemos mazgo įtampos kritinė riba yra 0,88, esant žemiau šios ribos sistemą pereina į nestabilų sistemos veikimo režimą. Normaliai tiriamasis mazgas dirba prie 0,902 įtampos lygio, kas reiškia, kad sistema beveik neturi (-0,6 Mvar) rezervinės reaktyviosios apkrovos tinkle. Iš kreivės pasirinkta šiame mazge įrengti 12,85 Mvar kompensacinį įrenginį, kad sisteminis mazgas galėtų dirbti artima nominaliai 1,0 įtampai.



14 pav. Kompensacinio įrenginio vieta teorinėje elektros sistemoje



15 pav. 6-ojo elektros mazgo su 12,85 Mvar kompensaciniu įrenginiu QU kreivė normaliu maitinimo režimu



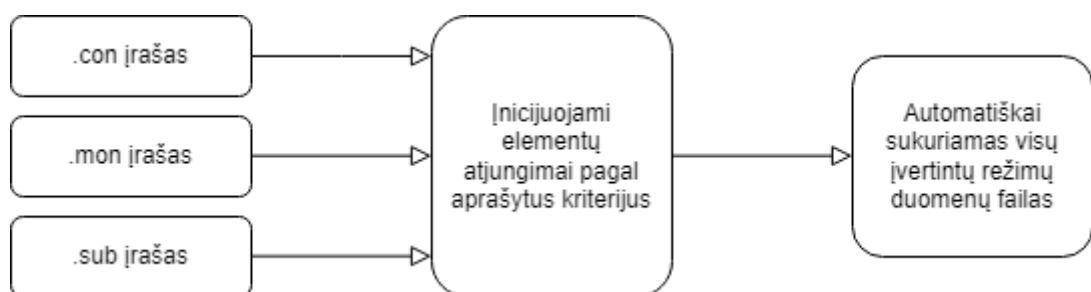
16 pav. Sisteminių elektros mazgų įtampos profiliai prijungus 12,8Mvar kompensacinį įrenginį

Prijungus 12,85 Mvar kompensacinį įrenginį 6-ajame mazge nustatyta, kad normaliu režimu tiriamasis elementas dirba prie nominalaus įtampos lygio, taip pat nustatyta, kad iki nestabilaus elektros tinklo režimo turimas 11,52 Mvar reaktyviosios galios rezervas. 9 paveiksle matyti, kad kitų elektros mazgų elektriniai parametrai taip pat pasikeitė, tačiau esminiu pakitimų neleidžiančių tinklui tinkamai dirbti neaptikta.

3.2. Nenumatytų atvejų tyrimas

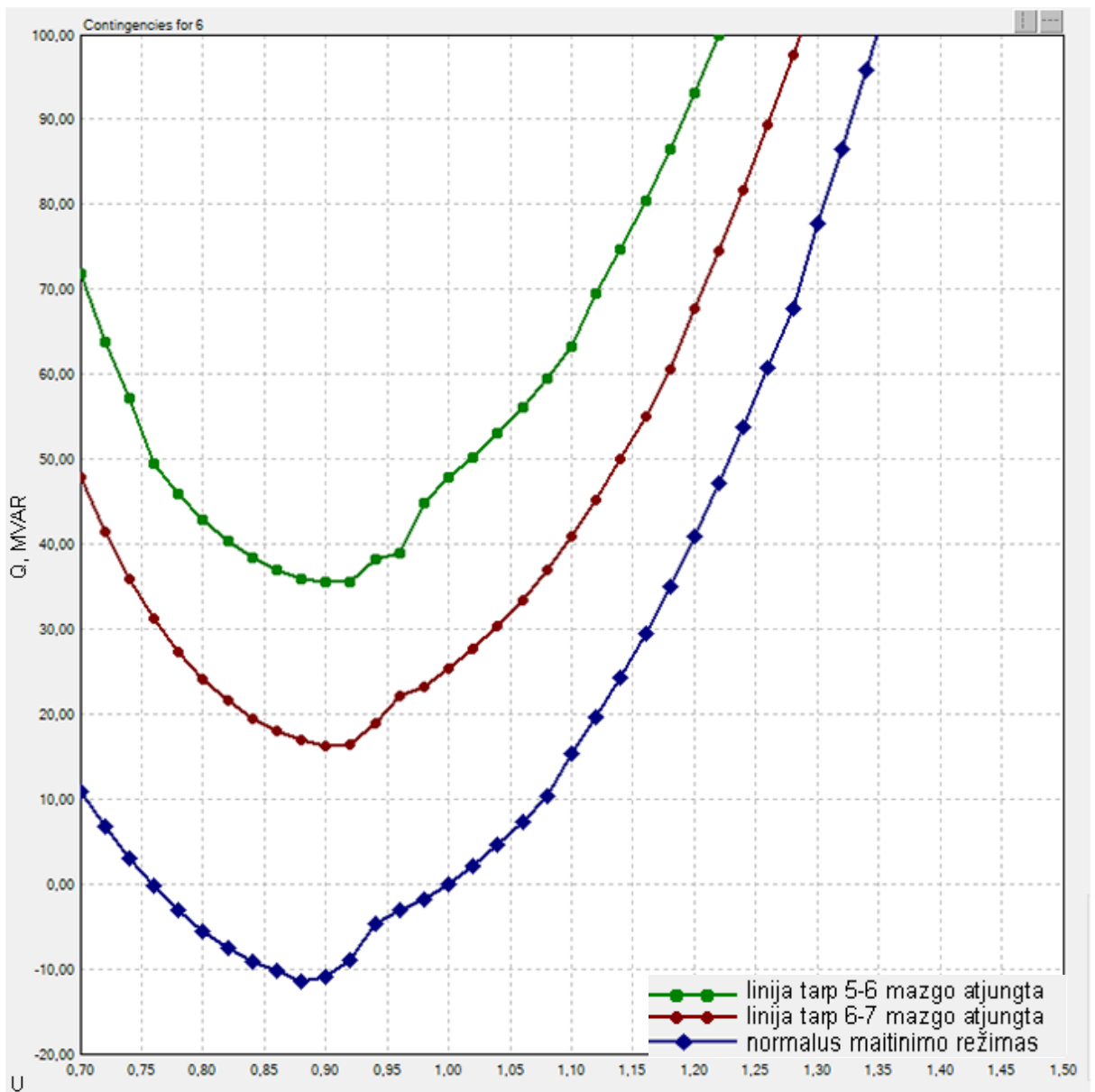
Sekančiai tyrime siekta ištirti kaip tiriamasis sistemos elementas dirba tinkle įvykus nenumatytiems tinklo elementų atjungimams, esant avariniams režimams. Atliekant šią analizę pasinaudota PSS/E programinės įrangos nenumatytų atvejų analizės (*angl. Contingency analysis*) funkcija. Supaprastintu PSS/E įrangos programiniu kodu buvo sukurti 3 funkciniai įrašai būtini minėtos funkcijos veikimui:

1. .con įrašas – programinis įrašas, kuriame aprašoma atjungimų metodika (N-1, N-X);
2. .mon įrašas – programinis įrašas, kuriame aprašomas elementas, kurio parametrai stebimi;
3. .sub įrašas – programinis įrašas, kuriame identifikuojama kiek turime atskirų sistemų;



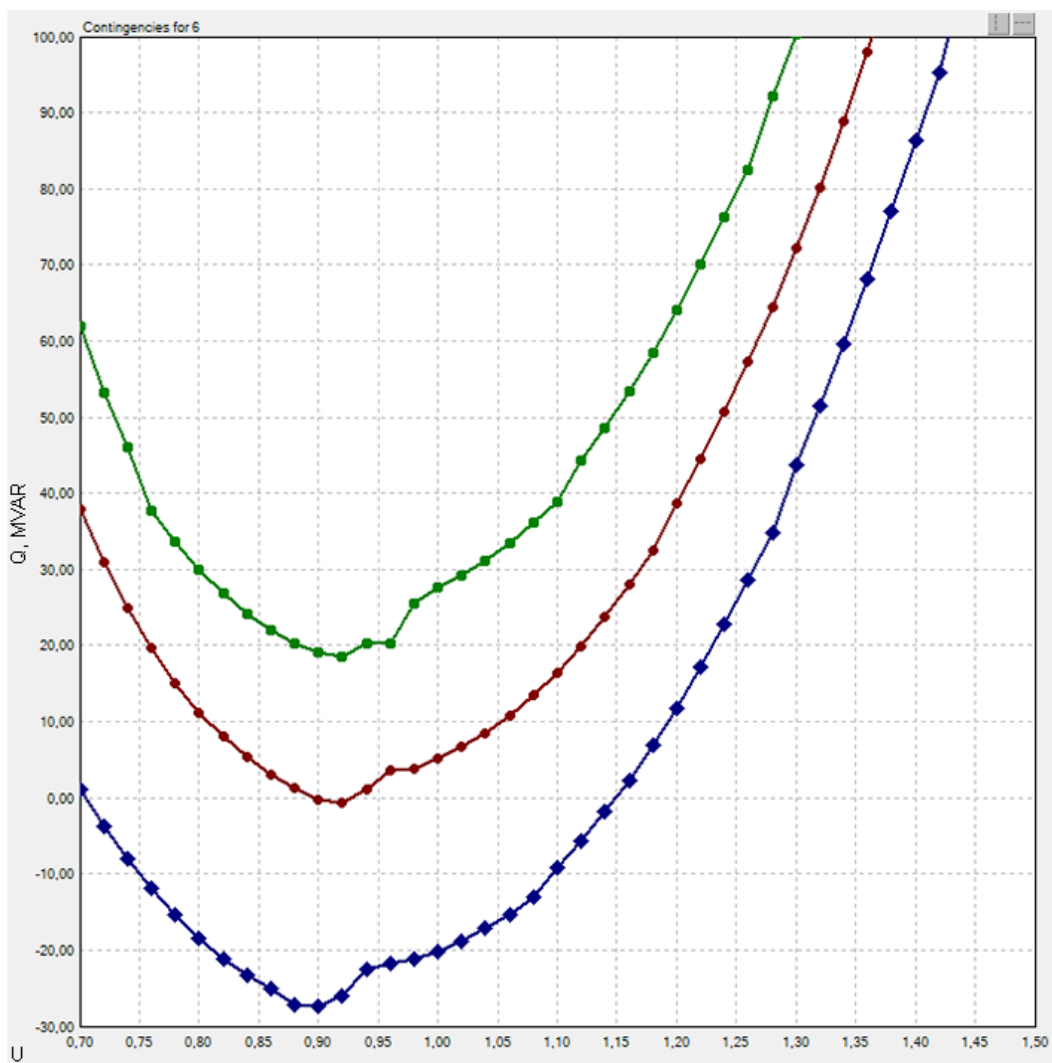
17 pav. PSS/E funkcijos *Contingency analysis* aprašymo algoritmas

Inicijuota PSS/E funkcija veikia N-1 atjungimų principu ir programinės įrangos atmintyje išsaugo režimo parametrus. Sekančiai inicijuotas QU kreivės parengimas nenumatytiems atjungimams.

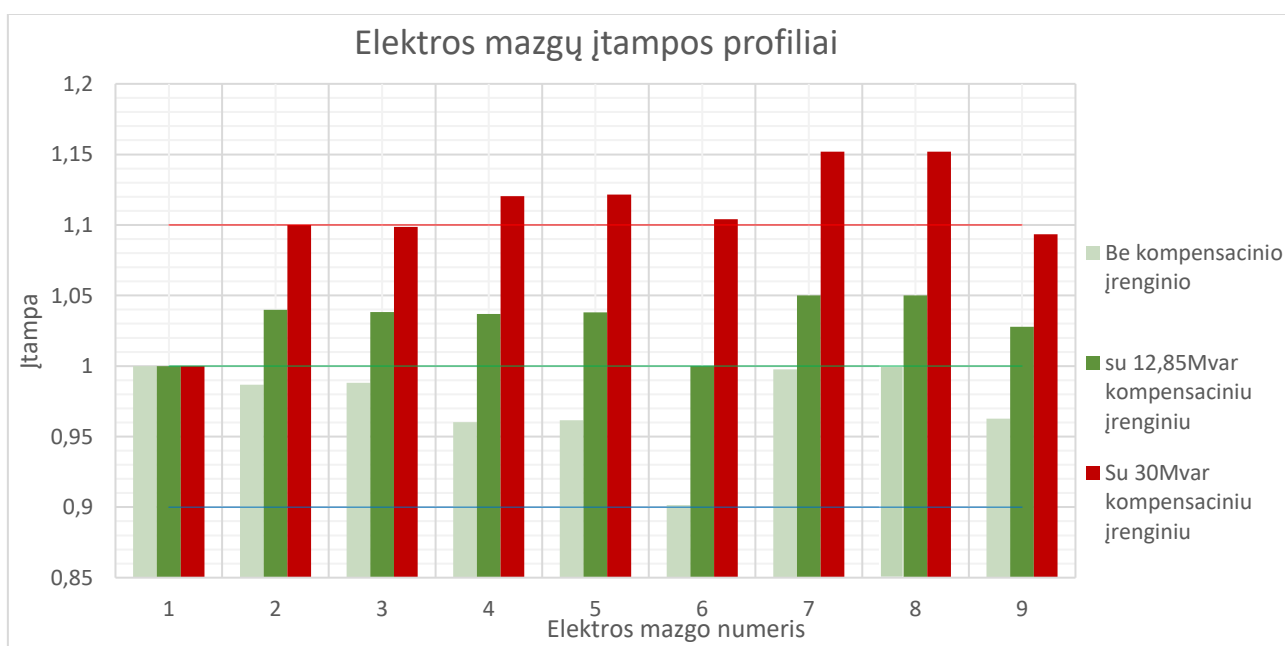


18 pav. 6-ojo elektros mazgo QU kreivės nenormaliu maitinimo režimu

Abi QU kreivės yra virš pradinės 0,00 horizontalės, kas reiškia, kad avariniu režimu sistema nepajėgs veikti tinkamai joms papildomai netiekiant reaktyviosios galios. Nustatyta, kad atjungus 5–6 mazgų elektros liniją reikalingas minimalus 38,13 Mvar papildomas reaktyviosios galios tiekimas, atjungus 6-7 liniją reikalingas minimalus 16,14 Mvar tiekimas. Kad sistema galėtų veikti avarinio atjungimo metu, vietoj esamo 12,85 Mvar kompensacinio įrenginio buvo sumodeliuotas 30 Mvar kompensacinis įrenginys.



19 pav. 6-ojo elektros mazgo QU kreivės nenormaliu maitinimo režimu, prijungus 30 Mvar kompensacinį įrenginį



20 pav. Sisteminių elektros mazgų įtampos profiliai prijungus 30 Mvar kompensacinį įrenginį

Ištyrus tinklą su įrengtu 30 Mvar kompensaciniu įrenginiu nustatyta, kad atjungus elektros linija tarp 6-7 mazgo, elektros tinkle yra 0,66 Mvar reaktyviosios galios rezervas, tačiau beveik visuose sistemos mazguose viršijama 0,9–1,1 ilgalaikės leistinos įtampos ribos. Vadovaujantis Lietuvos elektros energetikos sistemos perdavimo operatoriaus įtampos kokybinių parametrų reikalavimais, elektros tinklas gali dirbti trumpalaikiu avariniu iki 20 min 123-127 kV įtampos ribose [37].

Išvados

1. Sudarytas teorinis elektros sistemos modelis suteikė vertingą informaciją apie sistemos elgesį ir parametrus, leisdamas išsamiau suprasti jos veikimą bei svarbiausius stabilumo aspektus.
2. Atliktus susidaryto tinklo modelio galios srautų skaičiavimus buvo identifikuoti įtampos lygiai kiekviename sisteminiame mazge. Pasinaudojus įtampos jautrumo analizės metodu nustatytas didžiausias elektros sistemos 6-ojo mazgo jautrumo koeficientas – 0,6019, kuris nurodė silpniausią sistemos vietą.
3. Iš QU priklausomybių kreivių nustatyta, kad elektros tinklui veikiant normalios sąlygomis 6-ajame sistemos mazge praktiškai nėra (0,6Mvar) rezervinės reaktyvios galios, todėl siekiant palaikyti artimą nominaliai įtampa šiame mazge parinkta sumodeliuoti 12,85 Mvar kondensatorių bateriją.
4. Po papildomai sumodeliuoto kompensacinio įrenginio nustatyta, kad normaliu sistemos režimu 6-asis mazgas dirba prie nominalaus įtampos lygio 1,0, taip pat nustatyta, kad iki nestabilaus elektros tinklo režimo turimas 11,52 Mvar reaktyviosios galios rezervas.
5. Po sumodeliuotu avarinių režimų: atjungiamo 5–6 mazgų elektros liniją, atjungiamo 6–7 mazgų elektros liniją nustatyta, kad 6-asis sistemos mazgas avariniu režimu tampa induktyvinio pobūdžio elementu ir norint šiam veikti reikalingas minimalus ir nepertraukiamas 16,14 Mvar papildomas reaktyviosios galios tiekimas. Išnagrinėjus elektros tinklą su papildomai tiekiamą 16,14 Mvar apkrova nustatyta, kad avariniame režime, įvykus gedimui 6-7 tiekimo linijoje, elektros tinklas pagal perdavimo tinklo operatoriaus reikalavimus gali dirbti tik iki 20 minučių.

Literatūros sąrašas

1. LIETUVOS ENERGETIKOS AGENTŪRA. Aktuali AEI statistika.[žiūrėta 2023 03 18]. Prieiga per internetą: <https://www.ena.lt/aktuali-aei-statistika/>
2. P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, pp. 1387-1401, May 2004
3. Yong Tang. Voltage Stability Analysis of Power System. 1st ed., Springer, 2021. [žiūrėta 2024 04 18]. Prieiga per internetą: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-16-1071-4>
4. Kundur, Prabha; Balu, N.J.; Lauby, M.G. "Power System Stability and Control." New York: McGraw-Hill, 2009
5. Hatziargyriou, N. „Definition and classification of power system stability revisited & extended“. IEEE Trans. Power Syst. 36, 3271–3281. [žiūrėta 2023 03 18]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9286772>
6. Richard G. Farmer “Power System Dynamics and Stability” Richard G. Farmer, Arizona State University. [žiūrėta 2023 03 18]. Prieiga per internetą: <https://ijrar.org/papers/IJRAR1AWP015.pdf>
7. K. M. Hopkinson, M. S. S. Johnson, R. A. Maslowski and F. Milano, "Power System Stability Analysis Based on Power Injection," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 3, pp. 2405-2413, May 2016. (Journal Paper)
8. B. S. Abdurraheem and C. K. Gan, " Power System Frequency Stability and Control: Survey "International Journal of Applied Engineering Research, vol. 11, no. 8, pp. 5688-5692, 2016.
9. P. Kundur et al, “Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions,” IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, pp. 1387-1401, 2004.
10. Chakrabarti, S. K. (2019). Dynamic and Transient Stability. In Electric Power Grid Reliability Evaluation (pp. 77-103). Elsevier. [žiūrėta 2024 05 02]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128498965000040>
11. Kaur, A., & Jaiswal, P. (2015). Review and Analysis of Voltage Collapse in Power System. IEEE Transactions on Power Systems, 30(2), 961-971. [žiūrėta 2024 05 02]. Prieiga per internetą: <https://www.semanticscholar.org/paper/Review-and-Analysis-of-Voltage-Collapse-in-Power-Kaur-Jaiswal/6865c4512532e8981a188c915cbf3beace44df58>
12. CIGRE. (1990). Analysis of a Voltage Collapse Incident and Proposal for a Time-Based Hierarchical Containment Scheme. [žiūrėta 2024 05 02]. Prieiga per internetą: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/3839-02-1990-analysis-of-a-voltage-collapse-incident-and-proposal-for-a-time-based-hierarchical-containment-scheme.html>
13. Farid Karbalaeei; Shahriar Abbasi; Hamid Reza Shabani, "How Does Voltage Instability Occur?," in Voltage Stability in Electrical Power Systems: Concepts, Assessment, and Methods for Improvement , IEEE, 2023, pp.1-20, doi: 10.1002/9781119830634.ch1. [žiūrėta 2024 05 02]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9987447/metrics#metrics>

14. Muhammed, A.O.; Rawa, M. A Systematic PVQV-Curves Approach for Investigating the Impact of Solar Photovoltaic-Generator in Power System Using PowerWorld Simulator. *Energies* 2020, *13*, 2662. <https://doi.org/10.3390/en13102662>
15. R. Kumar, A. Mittal, N. Sharma, I. V. Duggal and A. Kumar, "PV and QV Curve Analysis Using Series and Shunt Compensation," *2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON)*, Sonapat, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9112917
16. D. Y. Wong, G. J. Rogers, B. Porretta and P. Kundur, "Eigenvalue analysis of very large power systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 472-480, May 1988, doi: 10.1109/59.192898.
17. Khosravi, A., Rezaei, N., & Golestaneh, F. (2014). Determination of static voltage stability margin of the power system prior to voltage collapse. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(5), 825–832. [žiūrėta 2024 05 05]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0803>.
18. Tahir, M.J.; Rasheed, M.B.; Rahmat, M.K. Optimal Placement of Capacitors in Radial Distribution Grids via Enhanced Modified Particle Swarm Optimization. *Energies* 2022, *15*, 2452. [žiūrėta 2024 05 05]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en15072452>
19. LITGRID. „Litgrid“ prijungė 80 MW saulės elektrinių parką Molėtų rajone. [interaktyvus] 2024 [žiūrėta 2024 05 05]. Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/naujienos/naujienos/litgrid-prijunge-80-mw-saules-elektriniu-parka-moletu-rajone/32739>
20. Duong, M.Q.; Leva, S.; Mussetta, M.; Le, K.H. A Comparative Study on Controllers for Improving Transient Stability of DFIG Wind Turbines During Large Disturbances. *Energies* 2018, *11*, 480. [žiūrėta 2024 05 05]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en11030480>
21. Furukakoi, Masahiro & Senjyu, Tomonobu & Funabashi, Toshihisa. (2016). Voltage stability improvement of power system using a shunt capacitor. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 339-344. 10.24084/repqj14.311.
22. ABB. Shunt reactors improve voltage stability and power quality [interaktyvus]. 2020 [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A6499&DocumentPartId=>
23. Deb, G. (2012). Ferranti Effect in Transmission Line. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2(4), 447–451. ISSN: 2088-8708. [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: <https://core.ac.uk/reader/329119563>
24. de Kock, J., & Strauss, K. (2004). Compensation. In J. de Kock & K. Strauss (Eds.), *Practical Power Distribution for Industry* (pp. 69-81). Newnes. ISBN 9780750663960. [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/B978-075066396-0/50004-9>
25. X. Zhou, K. Wei, Y. Ma and Z. Gao, "A Review of Reactive Power Compensation Devices," *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Changchun, China, 2018, pp. 2020-2024, doi: 10.1109/ICMA.2018.8484519.
26. Svinkūnas, G., & Navickas, A. (2013). Elektros energetikos pagrindai. KTU leidykla Technologija. DOI: 10.5755/e01.9786090210024 [interaktyvus] [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/elektros-energetikos-pagrindai>

27. Kulworawanichpong, T. (2010). Simplified Newton–Raphson power-flow solution method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(6), 551–558. [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.11.011>
28. Nanda, B., Babu, G. S., & Srinivas, C. (2017). Analysis of the power flow model and the programming of the Jacobian matrix. *International Conference of Electronics and Electrical Engineering*, 5(5), 1-3.
29. Serem, N.; Letting, L.K.; Munda, J. Voltage Profile and Sensitivity Analysis for a Grid Connected Solar, Wind and Small Hydro Hybrid System. *Energies* 2021, 14, 3555. [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en14123555>
30. Rehman, A. U., Farooq, A., Ahmad, I., Khan, S., Haq, I., Ayaz, A., & Saad, M. (n.d.). Steady state Contingency Analysis of IEEE-39 Bus system Using PSS/E. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, [tikėtina pirmos puslapio numeracija]. DOI: <https://doi.org/10.59287/ijanser.1339>
31. IEC. (2004). IEC 61850: "Communication networks and systems for power utility automation."
32. Hadj Salem, M.; Mansouri, K.; Chauveau, E.; Ben Salem, Y.; Abdelkrim, M.N. Multi-Power System Electrical Source Fault Review. *Energies* 2024, 17, 1187. [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en17051187>
33. Nnoniyelu, C. J., & Madueme, T. C. (2013). Power System Contingency Analysis: A Study of Nigeria's 330KV Transmission Grid. Paper presented at the Energy Source for Power Generation Conference, Electrical Engineering, University of Nigeria, Nsukka. Volume 4. [Žiūrėta 2024-05-05] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/255729015_Power_System_Contingency_Analysis_A_Study_of_Nigeria's_330KV_Transmission_Grid
34. Patel, R., Nimje, A., Godwal, S., & Kanojia, S. (2022). Contingency Analysis: A Tool to Improve Power System Security. In *Smart Technologies for Power and Green Energy* (pp. 79-92). DOI: 10.1007/978-981-19-2764-5_7. [Žiūrėta 2024-05-06] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/363752786_Contingency_Analysis_A_Tool_to_Improve_Power_System_Security
35. Roy, A. K., & Jain, S. K. (2011). Contingency Analysis in Power System [Master's thesis, Thapar University]. DOI: 10.13140/RG.2.1.4481.4240. [Žiūrėta 2024-05-06] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/264555752_CONTINGENCY_ANALYSIS_IN_POWER_SYSTEM_Thesis_of_Master_of_Engineering_in_Power_Systems_Electric_Drives_Thapar_University_Patiala
36. Valentin, N., Prieto, E., & Chauca, M. (2021). Voltage Stability Analysis based on Power Voltage (P-V) and Reactive Voltage (Q-V) Curves in Transmission Lines Using Static Var Compensator (SVC) with the Power Factory Program. In *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1993, 14th International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE) 2021, 25-27 June, 2021, Beijing, China (p. 012015). IOP Publishing Ltd. DOI: 10.1088/1742-6596/1993/1/012015
37. LITGRID. Perdavimo tinklo leistinų dažnio ir įtampos kokybinių parametrų aprašas. [interaktyvus] 2014 [žiūrėta 2024 05 05]. Prieiga per internetą: https://www.litgrid.eu/uploads/files/dir424/dir21/dir1/7_0.php

1 PRIEDAS

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM

SIMULATOR--PSS(R)E Xplore THU, MAY 02 2024 0:09

MBP

%MVA FOR TRANSFORMERS

IEEE 9

% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES

X----- FROM BUS -----X		AREA		VOLT	GEN		LOAD	SHUNT	RATING	
X----- TO BUS -----X		X			TRANSFORMER				RATING	
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	ZONE	PU/KV	ANGLE	MW/MVAR	MW/MVAR	MW/MVAR	%	SET
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	AREA	CKT	MW	MVAR	RATIO	ANGLE	%	SET
1	BUS1	110.00	1	1.0000	0.0	358.8	0.0	0.0		

BUS2	110.00	1	1	171.1	-99.4					
				1	110.00		-199.2L	0.0	-0.0	2
BUS9	110.00	1	1	187.7	-99.8					9
2	BUS2	110.00	1	0.9868	-18.9	0.0	32.0	0.0		

BUS1	110.00	1	1	-146.5	36.8					
				1	108.55		0.0	6.0	-0.0	1
BUS3	30.000	1	1	-20.0	-2.8	1.000UN				3
BUS4	110.00	1	1	134.5	-40.0					4
3	BUS3	30.000	1	0.9882	-18.3	20.0	0.0	0.0		

BUS2	110.00	1	1	20.0	3.0	1.000LK				
				1	29.647		3.0H	0.0	-0.0	2
4	BUS4	110.00	1	0.9603	-24.7	0.0	0.0	0.0		

BUS2	110.00	1	1	-128.5	8.7					
				1	105.63		0.0	0.0	-0.0	2
BUS5	30.000	1	1	-40.0	-2.1	1.000UN				5
BUS6	110.00	1	1	168.5	-6.6					6
5	BUS5	30.000	1	0.9616	-23.4	40.0	0.0	0.0		

BUS4	110.00	1	1	40.0	3.0	1.000LK				
				1	28.849		3.0L	0.0	-0.0	4
6	BUS6	110.00	1	0.9014	-31.9	0.0	200.0	0.0		

BUS4	110.00	1	1	-158.6	-12.8					
				1	99.152		0.0	96.8	-0.0	4

BUS7	110.00	1	1	-41.4	-84.0					7
7	BUS7	110.00		1	0.9976	-29.0	0.0	0.0	0.0	

BUS6	110.00	1	1	1	109.73		0.0	0.0	-0.0	6
				44.2	-36.6					
BUS8	30.000	1	1	-20.0	-4.8	1.000LK				8
BUS9	110.00	1	1	-24.2	41.3					9
8	BUS8	30.000		1	1.0000	-28.4	20.0	0.0	0.0	

BUS7	110.00	1	1	1	30.000		5.0R	0.0	-0.0	7
				20.0	5.0	1.000UN				
9	BUS9	110.00		1	0.9627	-26.8	0.0	125.0	0.0	

BUS1	110.00	1	1	1	105.90		0.0	50.0	-0.0	1
				-150.7	32.6					
BUS7	110.00	1	1	25.7	-82.6					7

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E Xplore

MON, MAY 06 2024 22:07

MBP

%MVA FOR TRANSFORMERS

IEEE 9

% I FOR NON-TRANSFORMER BRANCHES

X----- FROM BUS -----X		AREA	VOLT	GEN		LOAD	SHUNT	RATING	
X----- TO BUS -----X				TRANSFORMER				RATING	
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	ZONE	PU/KV	ANGLE	MW/MVAR	MW/MVAR	MW/MVAR	SET
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	AREA	CKT	MW	MVAR	RATIO	ANGLE	%
1	BUS1	110.00	1	1.0000	0.0	363.1	0.0	0.0	

BUS2	110.00	1	1	174.3	-128.5	-255.3L	0.0	-0.0	2
BUS9	110.00	1	1	188.8	-126.8				9
2	BUS2	110.00	1	1.0398	-19.6	0.0	32.0	0.0	

BUS1	110.00	1	1	114.37	67.0	0.0	6.0	-0.0	1
BUS3	30.000	1	1	-20.0	3.2	1.000UN			3
BUS4	110.00	1	1	134.3	-76.2				4
3	BUS3	30.000	1	1.0383	-19.0	20.0	0.0	0.0	

BUS2	110.00	1	1	31.148	20.0	-3.0L	0.0	-0.0	2
4	BUS4	110.00	1	1.0368	-25.2	1.000LK	0.0	0.0	

BUS2	110.00	1	1	114.05	39.0	0.0	0.0	-0.0	2
BUS5	30.000	1	1	-40.0	-2.3	1.000UN			5
BUS6	110.00	1	1	168.2	-36.8				6
5	BUS5	30.000	1	1.0381	-24.1	40.0	0.0	0.0	

BUS4	110.00	1	1	31.142	40.0	3.0L	0.0	-0.0	4
6	BUS6	110.00	1	0.9993	-31.7	1.000LK	0.0	200.0	0.0

BUS4	110.00	1	1	109.92	-159.8	0.0	96.8	-12.8	4
				6.5					7

BUS7	110.00	1	1	-40.2	-90.4				
7	BUS7	110.00		1	1.0738	-29.0	0.0	0.0	0.0

BUS6	110.00	1	1	1	118.12		0.0	0.0	-0.0
				42.1	-55.8				
BUS8	30.000	1	1	-20.0	-2.8	1.000LK			
BUS9	110.00	1	1	-22.1	58.6				
8	BUS8	30.000		1	1.0752	-28.5	20.0	0.0	0.0

BUS7	110.00	1	1	1	32.255		3.0L	0.0	-0.0
				20.0	3.0	1.000UN			
9	BUS9	110.00		1	1.0279	-26.9	0.0	125.0	0.0

BUS1	110.00	1	1	1	113.07		0.0	50.0	-0.0
				-149.2	55.2				
BUS7	110.00	1	1	24.2	-105.2				